



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

감압법을 이용한
가스하이드레이트 회수생산시 해저지반
거동예측에 관한 수치해석적 연구

Numerical Analysis for Prediction of
Mechanical Behavior of Marine Sediment
during Depressurization Process of Gas Hydrate

2013년 8월

서울대학교 대학원
에너지시스템공학부
임 대 희

초 록

가스하이드레이트 추정 매장량은 전세계 에너지 수요를 약 5000년간 충족할 수 있는 막대한 양이며 우리나라의 경우 울릉분지에 연간 천연가스 사용량의 30배에 해당하는 가스하이드레이트가 매장되어 있는 것으로 추정하고 있다. 그러나, 해저면으로부터 약 150 m 아래에 형성되어 있는 가스하이드레이트 회수생산시, 생산정으로 물과 가스가 유입됨에 따라 미고결층으로 이루어진 가스하이드레이트 상부 해저층이 침하되어 해저 생산구조물을 손상시키고 가스가 대기로 누출되어 생산성을 저하시키는 문제점이 예상되므로 지반거동예측 연구가 필수적이라 할 수 있다.

지금까지 가스하이드레이트에 관한 연구는 물성시험 및 생산성관련 실험에 집중되어 있고 수치해석연구의 경우에도 일본 및 멕시코만 등 해외 지역의 지반거동예측에 대한 연구가 대부분이다. 이 중 감압법만을 활용한 해석사례는 전무하며 100 m이상의 광역현장규모로 수치해석을 실시한 경우도 거의 없는 실정이다.

이 연구에서는 동해 울릉분지에 2015년 실시예정인 감압법을 이용한 가스하이드레이트 시험생산에 앞서, 울릉분지 현장시추코어시료에 대한 감압법 적용 침하실험 결과를 FLAC^{2D} 해석 및 이론해의 산출결과와 비교하여 적용타당성을 확인하고 FLAC^{2D}를 이용하여 시험생산 후보 대상지인 UBGH-X 현장생산 조건인 200 m(너비)×180 m(높이)로 수치해석모사를 실시하였다.

시험생산 후보지 현장조건의 수치해석 결과로부터 시추공주변 지반 침하량을 분석한 바, 31일간 감압법 적용 시, 시추공 주변 해저면은 0.324 m 침하하였고 가스하이드레이트 층 직상부 지반은 0.484 m 침하하여 가스하이드레이트 직상부에서 최대침하가 발생함을 관찰하였고 아울러, 수평방향 해리 범위는 9.3 m에 달하는 것으로 나타났다.

시험생산 후보지 현장조건을 기초로 하여 감압법에 의한 가스하이드레이트 생산시 고려해야할 중요한 파라미터인 감압속도, 공저압, 공극률, 투수율, 가스하이드레이트 포화도 등 5가지로 지반침하에 대한 민감도 분석을 실시하였다.

감압속도에서는 저속감압이 지반안정유지에 유리하였고, 공저압은 감압정도(ΔP)가 클수록 침하량 및 수평방향 해리범위가 증가하는 뚜렷한 경향성을 확인할 수 있었으며 나머지 파라미터 공극률, 투수율, 가스하이드레이트 포화도의 증가에 따라 침하량 및 수평방향 해리범위가 증가함을 확인할 수 있었다.

이중에서도 시간에 따라 변하는 투수율의 차이가 해리 전파거리 및 침하량에 가장 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 여기에서의 분석결과는 향후 시험생산을 위한 시추공정 계획 시 뿐만아니라 울릉분지 상업생산시에도 참고자료로 활용 가능할 것으로 기대된다.

주요어: 가스하이드레이트 포화도, 해리, 미고결층, 침하, 압밀, FLAC^{2D}

학 번: 2011-23427

목 차

List of Figures	v
List of Tables	xiv
1. 서론	1
1.1 연구의 필요성	1
1.2 연구의 목적	2
2. 기본배경 및 주요이론	3
2.1 기본 배경	3
2.1.1 가스하이드레이트 소개	3
2.1.2 가스하이드레이트 생산회수 기술	15
2.1.3 가스하이드레이트 기술개발 현황	27
2.2 가스하이드레이트 해리에 관한 주요 이론 및 물성	31
2.2.1 압밀(consolidation)이론 및 삼축 압축 시험	31
2.2.2 탄성물성(elastic properties)	34
2.2.3 Mohr-Coulomb 물성	36
2.2.4 공극률과 투수율(porosity and permeability)	40
3. 가스하이드레이트 실내실험 및 수치해석 사례	43
3.1 실내실험 목적 및 분류	43
3.2 실내실험 사례	46
3.3 수치해석 목적 및 분류	57
3.4 수치해석 사례	59

4. 해저지반거동 수치해석	68
4.1 해석 조건	68
4.1.1 FLAC ^{2D} 기본이론	68
4.1.2 수치해석 방법 및 적용타당성 검토	72
4.1.3 연구대상후보지(UBGH-X) 수치해석 모델 구성	84
4.2 해석 결과	90
4.2.1 가스하이드레이트 감압시 해저지반 역학적 거동예측	90
4.2.2 연구대상 후보지(UBGH-X) Parametric Study	102
 5. 결론	 149
 부록 A. 가스하이드레이트 지반안정분석시스템 구축	 153
A.1 필요성	153
A.2 시스템 주요구성	153
A.3 기타 주변 구성	160
A.4 지반안정분석 시스템 프로세스	163
 부록 B. 가스하이드레이트 인공퇴적층 모사	 165
B.1 실험용 인공규사 선택	165
B.2 인공 가스하이드레이트 형성 방법	167
B.3 실험 방법	167
 참고문헌	 171

List of Figures

Fig. 2.1 Present condition and prospect of development of unconventional gas resources (이정환, 2009)	3
Fig. 2.2 Distribution map of gas hydrate and hydrate resources over the world (허대기, 2005)	4
Fig. 2.3 Amount of organic carbons from energy sources (주익찬, 2013)	5
Fig. 2.4 Ulleng basin with gas hydrate resources	6
Fig. 2.5 GH resorce pyramid (Masanori et al, 2011)	6
Fig. 2.6 Gas-Water Ratio of Methane hydrate (주익찬, 2013)	7
Fig. 2.7 Pressure versus temperature phase diagram for simple methane hydrate (Henriet et al, 1998)	7
Fig. 2.8 Hydrate stability zone in subsea sediments(Henriet et al, 1998)	8
Fig. 2.9 Type of GH depositons (Masanori et al., 2011)	9
Fig. 2.10 Classification of pore filling type GH reservoirs (Masanori et al., 2011)	10
Fig. 2.11 CO ₂ generation per unit of energy (류병재, 2005)	11
Fig. 2.12 Systems of gas hydrate layer (주익찬, 2013)	12
Fig. 2.13 Expected IRR(Internal Rate of Return) of production of gas hydrate along the systems of layers (주익찬, 2013)	12
Fig. 2.14 Potential effect of natural gas hydrate dissociation on (a) pipeline and (b) production facility (류병재, 2005)	13
Fig. 2.15 (a) Change in atmospheric content of CH ₄ , NO ₂ , and CO ₂	

between 1700 and 1900, and (b) slide slumping caused by methan hydrate dissociation (류병재, 2005)	14
Fig. 2.16 Main production method of gas hydrate (이정환 등, 2009)	15
Fig. 2.17 Phase boundary of methane gas hydrate (한국지질자원연구원, 2010)	16
Fig. 2.18 Production method using depressurization (한국지질자원연구원, 2010)	16
Fig. 2.19 Phase boundary of methane gas hydrate (한국지질자원연구원, 2010)	17
Fig. 2.20 Inhibitor injection method (한국지질자원연구원, 2010)	18
Fig. 2.21 CO ₂ Replacement Method (한국지질자원연구원, 2010)	19
Fig. 2.22 Mechanism of GH dissociation by depressurization with multiple wells (Masanori et al., 2011)	20
Fig. 2.23 Effect of initial temperature on gas production (depressurization: Ka =500mD) (Masanori et al., 2011)	21
Fig. 2.24 Effect of permeability on gas production (depressurization: T=285.15K) (Masanori et al., 2011)	21
Fig. 2.25 Example prediction results for Well-B in the Eastern Nankai Trough (Masanori et al., 2011)	22
Fig. 2.26 Example calculation results for energy efficiency (Masanori et al., 2011)	23
Fig. 2.27 Application of GH dissociation and production methods in terms of reservoir permeability and initial temperature (Masanori et al., 2011)	24
Fig. 2.28 Schematic illustration for consolidation of subsea ground	

and flow of gas and water during GH dissociation	31
Fig. 2.29 Spring-cylinder model (modified from Braja, 1998)	32
Fig. 2.30 Water and spring taking divided load (modified from Braja, 1998)	33
Fig. 2.31 Mohr-Coulomb fracture envelope	34
Fig. 2.32 Change in (a) G_{\max} , (b) E_{flex} with time during dissociation of gas hydrate (GH saturation(%), Priest et al.(2011)	35
Fig. 2.33 Idealized dissociation process: (a) sand grains with hydrate cement at contacts, (b) start of hydrate dissociation occurring all over hydrate, (c) at the end of hydrate dissociation (Priest et al, 2011)	38
Fig. 2.34 Relation graph among cohesion, normal stress, shear stress and internal friction angle	39
Fig. 3.1 (a) Change in shear modulus and (b) Young's modulus during hydrate formation over time	46
Fig. 3.2 Idealized growth of hydrate during formation; (a) sand grains with water at grain contacts, (b) start of hydrate formation at water-gas interface with formation of "hydrate cover", (c) end of hydrate formation	47
Fig. 3.3 Deviator stress σ_{dev} versus axial strain ϵ_a and lateral strain ϵ_l for Toyoura and hydrate-Toyourea sand specimens under 1 MPa effective confining pressure	48
Fig. 3.4 Deviator stress σ_{dev} versus axial strain ϵ_a and lateral strain ϵ_l for sand and hydrate-sand specimens containing Toyoura sand, number 7 silica sand, and number 8 silica sand under	

1 MPa effective confining pressure	49
Fig. 3.5 Consolidation behavior during GH dissociation with different effective stresses	51
Fig. 3.6 Schematic diagram of pressure cell for in-situ hydrate-bearing sediment specimens ① main body ② top cap with axial pressure applying system ③ bottom cap ④ piston ⑤ bottom cap ⑥ bottom plate	52
Fig. 3.7 Evolution of pore pressure and vertical displacement during step depression (Arrow indicates X-ray CT)	54
Fig. 3.8 Evolution of pore pressure and vertical displacement during step depressurization 9C-7R sand (Arrow indicates X ray CT)	55
Fig. 3.9 Evolution of pore pressure and vertical displacement during step depression (10B-10R Fissured clay) Arrow indicates X-ray CT ..	56
Fig. 3.10 Absolute permeability as a function of GH saturation	59
Fig. 3.11 Formulation of reduction factor for porosity ratio in absolute permeability equation	60
Fig. 3.12 Amount of subsidence at neighborhood of production well with time according to different N_{ψ}	61
Fig. 3.13 Relationship of deviator stress volumetric strain vs. axial strain(left) and relationship of friction angle and cohesion with hydrate saturation for hydrate-sand in the Nankai Trough(right, Masui et al., 2006)	62
Fig. 3.14 Alternating sand and clay layers in the Nankai Trough(left) and unit layer(right)	63
Fig. 3.15 Vertical displacement of soil in the study with/without	

thermal consideration	64
Fig. 3.16 Effective stress along radial direction bi) simulation with RL (Sand layer+Clay layer)=0.5m bii) RL=1.0m biii)RL=2.0m	64
Fig. 3.17 Finite element mesh and boundary conditions	65
Fig. 3.18 Number of elements and nodes.	66
Fig. 3.19 Conditions of heating and depressurization (a) Dissociating conditions with equilibrium curve (b) heating condition (c) depressurization condition	66
Fig. 3.20 Simulation results for the depressurization method (a) mean skeleton stress (b) vertical displacement.	67
Fig. 4.1 Basic explicit calculation cycle	69
Fig. 4.2 Sign convention of normal stress, shear stress and axial direction displacement respectively	70
Fig. 4.3 General sequence of interpretation in FLAC ^{2D}	71
Fig. 4.4 Algorithm for analyzing marine sediment during depressurization process of gas-hydrate	74
Fig. 4.5 Distribution of Particle size (μm) of gas hydrate sediment at Ulleung basin	76
Fig. 4.6 Distribution of particle size of artificial silica sand, Hama sand #8 (μm)	76
Fig. 4.7 Intial porosity vs. final porosity	78
Fig. 4.8 Initial porosity vs. reduction factor	78
Fig. 4.9 Configuration and boundary condition for verification	80
Fig. 4.10 Result of experiment and simulation	81
Fig. 4.11 Location of Ulleung basin and information of field	

investigation (신호진 등., 2012)	84
Fig. 4.12 Depressurization at the site UBGH-X	85
Fig. 4.13 Schematic diagram of the object to be analyzed	86
Fig. 4.14 Formulation of reduction factor with respect to porosity ratio in absolute permeability equation (Sakamoto et al., 2008) ..	89
Fig. 4.15 Observation point about pore pressure and vertical displacement	90
Fig. 4.16 Pore pressure vs. time (days) at high/low speed depressurization	91
Fig. 4.17 Vertical displacement vs. time(days) at high/slow depressurization	91
Fig. 4.18 Problems to be expected from settlement due to depressurization process of gas-hydrate (지식경제부, 2012)	93
Fig. 4.19 Vertical displacement contour and displacement vector of depressurization to 7 MPa	96
Fig. 4.20 Flow vector (50x100)	97
Fig. 4.21 Permeability change (the range of diffusing dissociation)	98
Fig. 4.22 Contour in effective horizontal stress at 1 month	99
Fig. 4.23 Effective vertical/horizontal stress vs. time at location of perforation of production pipe	99
Fig. 4.24 Pore pressure vs. time (1 month)	100
Fig. 4.25 Vertical settlement vs. time (1 month)	101
Fig. 4.26 Vertical displacement of depressurization to 10 MPa (1 month)	103
Fig. 4.27 Permeability change(range of diffusing dissociation)	104
Fig. 4.28 Pore pressure vs. time (1 month)	105
Fig. 4.29 Vertical settlement vs. time (1 month)	105
Fig. 4.30 Vertical displacement depressurization to 4 MPa (1 month) ..	107

Fig. 4.31 Permeability change (range of diffusing dissociation)	108
Fig. 4.32 Pore pressure vs. time(1 month)	109
Fig. 4.33 Vertical settlement vs. time(1 month)	109
Fig. 4.34 Vertical displacement according to target pore pressures ...	111
Fig. 4.35 Pore pressure vs. time according to target pressure	111
Fig. 4.36 Horizontal range of dissociation according to target pore pressure	112
Fig. 4.37 Formulation of reduction factor with respect to porosity (sakamoto et al., 2008)	114
Fig. 4.38 Vertical displacement at depressurization to 4 MPa (1 month) ...	116
Fig. 4.39 Permeability change (range of diffusing dissociation)	117
Fig. 4.40 Pore pressure vs. time (1 month)	118
Fig. 4.41 Vertical settlement vs. time (1 month)	118
Fig. 4.42 Vertical displacement (1month)	120
Fig. 4.43 Permeability change (range of diffusing dissociation)	121
Fig. 4.44 Pore pressure vs. time (1 month)	122
Fig. 4.45 Vertical displacement vs. time (1 month)	123
Fig. 4.46 Vertical displacement according to porosity	124
Fig. 4.47 Pore pressure vs. time according to different porosity	125
Fig. 4.48 Horizontal range of diffusion according to target pore pressure	126
Fig. 4.49 Vertical displacement (1month)	127
Fig. 4.50 Permeability change (range of diffusing dissociation)	128
Fig. 4.51 Pore pressure vs. time (1 month)	129
Fig. 4.52 Vertical displacement vs. time (1 month)	129
Fig. 4.53 Vertical displacement at depressurization to 7 MPa (1 month)	131

Fig. 4.54 Permeability change (range of diffusing dissociation)	132
Fig. 4.55 Pore pressure vs. time (1 month)	133
Fig. 4.56 Vertical displacement vs. time (1 month)	134
Fig. 4.57 Vertical displacement according to different permeability ..	135
Fig. 4.58 Pore pressure vs. time according to different permeability ..	136
Fig. 4.59 Horizontal range of dissociation according to permeability	136
Fig. 4.60 Vertical displacement (1month)	138
Fig. 4.61 Permeability change (range of diffusing dissociation)	140
Fig. 4.62 Pore pressure vs. time (1 month)	141
Fig. 4.63 Vertical displacement vs. time (1month)	141
Fig. 4.64 Vertical displacement (1month)	143
Fig. 4.65 Permeability change (the range of diffusing dissociation) ..	144
Fig. 4.66 Pore pressure vs. time (1 month)	145
Fig. 4.67 Vertical settlement vs. time (1 month)	145
Fig. 4.68 Vertical displacement according to different gas hydrate saturation	146
Fig. 4.69 Pore pressure vs. time according to gas hydrate saturation ·	147
Fig. 4.70 Horizontal range of dissociation according to gas hydrate saturation	147
Fig. A.1 System of analyzing stability on gas hydrate specimen	154
Fig. A.2 Shelf to put sands into the high pressure cell	154
Fig. A.3 High pressure reacting cell for observing deformation of specimen	156
Fig. A.4 Upper part of high pressure cell	157
Fig. A.5 Production pipe with vertical scale	158

Fig. A.6 Lateral part of the high pressure cell	159
Fig. A.7 Monitoring System of analyzing stability on specimen	160
Fig. A.8 Program computing equilibrium pressure by Sloan	161
Fig. A.9 Equilibrium pressure and temperature curve	161
Fig. A.10 Solenoid valve and wet gas meter	162
Fig. A.11 System of analyzing stability on hydrate sediment	164
Fig. A.12 Acryl separator and stainless separators (with window scale)	164
Fig. B.1 Distribution of Particle size(μm) of gas hydrate sediment at Ulleung basin	165
Fig. B.2 Distribution of particle size of artificial silica sand, Hama sand #8(μm)	166
Fig. B.3 Experimental process for production GH	168

List of Tables

Table 2.1 Unconventional resources over the world (주익찬, 2013)	5
Table 2.2 Problems of life cycle in production well	24
Table 2.3 General drained friction angle of sand and silt (Braja, 1998)	37
Table 2.4 Porosity change of sediments with different average sand grain diameters (Sakamoto et al. 2008)	41
Table 3.1 Literature of laboratory experiments on GH	43
Table 3.2 Experimental conditions for consolidation-permeability tests	50
Table 3.3 Amount of settlement on site sediment by depressurization	56
Table 3.4 Literature of numerical analysis on GH	57
Table 4.1 Properties of artificial silica sand used in experiment and simulation	77
Table 4.2 (a) Range of units in each well (b) Properties for calculation using sonic log	79
Table 4.3 Properties before dissociation and after dissociation	79
Table 4.4 The results of experiment, analytic solution and numerical analysis	83
Table 4.5 Initial condition and variable parameter along hydrate saturation	87
Table 4.6 Estimation equations and values before and after dissociation	87

Table 4.7 Input parameter along hydrate saturation	88
Table 4.8 Properties before and after dissociation	89
Table 4.9 Summary of initial condition	93
Table 4.10 Summary of results	101
Table 4.11 Summary of parametric study	102
Table 4.12 Summary of initial condition	102
Table 4.13 Summary of results for $p_w = 10$ MPa	106
Table 4.14 Primary initial conditions	106
Table 4.15 Summary of results	110
Table 4.16 Porosity and permeability before and after dissociation ..	114
Table 4.17 Primary initial conditions	115
Table 4.18 Summary of results (porosity: 0.64)	119
Table 4.19 Primary initial Conditions	119
Table 4.20 Summary of results (porosity: 0.71)	124
Table 4.21 Primary initial Conditions	126
Table 4.22 Summary of results for 1.5K	130
Table 4.23 Primary initial Conditions	130
Table 4.24 Summary of results (0.5k)	134
Table 4.25 Primary initial Conditions	137
Table 4.26 Summary of result for $Sh=0.6$	142
Table 4.27 Primary initial Conditions	142
Table 4.28 Summary of results ($Sh = 40\%$)	146
Table B.1 Properties of artificial silica sand used in experiment and simulation	166

1. 서론

1.1 연구의 필요성

가스하이드레이트에 함유된 유기탄소의 추정 매장량은 10조 LNG 톤으로 전 세계에 매장된 화석에너지에 포함된 유기탄소량의 2배이며 전 세계 에너지 수요를 약 5,000년간 충족할 수 있는 막대한 양이다. 우리나라는 울릉분지에 연간 천연가스 사용량(2,000만 톤)의 30년 사용분(6억톤)의 가스하이드레이트가 매장되어 있는 것으로 추정하고 있다(허대기, 2005).

울릉분지의 경우 수심 2,150m 해저면 으로부터 약 150m 아래에 가스하이드레이트 퇴적층이 형성(신효진 등, 2012)되어 있어 가스하이드레이트 회수 생산 시 생산정으로 물과 가스가 생산됨에 따라 미고결층(이정환, 2009)으로 이루어진 해저층이 침하되어 생산구조물을 손상시키고 가스가 대기로 누출되어 생산성을 저하시키며 대기를 오염(천연가스 누출이 온실효과에 미치는 영향은 이산화탄소의 21배)시킬 수 있는 문제점이 예상되므로 해저지반 거동 예측 연구가 필수적이라 할 수 있다.

이러한 해저층 침하현상은 자연적으로 발생한 사례가 보고된 바 있고, 빙하기 동안 해수면 하강에 따른 압력감소로 많은 양의 가스하이드레이트가 급격하게 해리되어 사면붕락이 발생한 사례가 있다(Makogon, 1997). 특히, 해저사면 붕괴가 대규모로 발생할 경우 지진을 일으켜 쓰나미로 인한 연안지역 피해를 예상할 수 있는데 이런 측면이 인간에게 가장 직접적이고 긴박한 문제가 될 수 있다(Kvenvolden, 2000).

따라서, 실제현장조건으로 가스하이드레이트 회수생산시 생산정 주변의 해저지반거동을 모사하여 예측하고자 한다.

1.2 연구의 목적

본 연구에서는 산업통상자원부 주관으로 동해 울릉분지에 실시예정인 감압법을 이용한 가스하이드레이트 시험생산(2015년 예정)에 앞서, 울릉분지 현장시추코어시료에 대한 감압법 적용 침하실험(지식경제부, 2011)결과를 FLAC^{2D} 해석 및 이론해의 산출결과와 비교하여 적용타당성을 확인하였다. FLAC^{2D}를 이용하여 가스하이드레이트 시험생산 후보대상지인 UBGH-X 광구(울릉분지 가스하이드레이트 시추 지역 중 1곳으로 이하, UBGH-X라함)의 현장조건으로 수치해석을 실시한 후 예측한 지반거동 분석결과를 시험생산시추공정 계획시 반영하여 생산성 향상에 기여하고자 한다.

아울러, 시험생산 후보지 현장조건을 기초로 하여 감압법에 의한 가스하이드레이트 생산 시 고려해야할 중요한 파라미터인 감압속도, 공저압, 공극률, 투수율, 가스하이드레이트 포화도 등 5가지의 지반침하에 대한 민감도를 분석함으로써 파라미터 변화에 따른 해저 지반거동에 축을 통해 향후 상업생산 시 가스하이드레이트(이하, GH라함) 생산성 향상에 일조하고자 한다.

2. 기본배경 및 주요이론

2.1 기본 배경

2.1.1 가스하이드레이트 소개

(1) 생성원리 및 매장량

가스하이드레이트란 천연가스가 저온, 고압 하에서 물 분자와 결합하여 형성된 고체상태의 결정으로 물 분자 내부에 주로 메탄으로 구성된 가스 분자가 포집된 상태로 존재하는 것을 의미한다. 특히, 해저에서 생성된 GH의 경우에는 Fig. 2.1과 같이 해저면 심부 하부지층의 고온, 고압에서 유기물이 분해될 때 생성되는 생물기원(biogenic)의 메탄가스가 물 분자 내부에 포집되어 해저면의 저온, 고압에 의해 고체상태의 결정이 되는 것을 말한다. GH의 천연가스와 물 분자의 결합은 일반적인 화학적 결합이 아닌, 물 분자가 만드는 격자 속에 천연가스 분자가 들어가는 물리적 결합에 의해 형성된다.



Fig. 2.1 Present condition and prospect of development of unconventional gas resources (이정환, 2009)

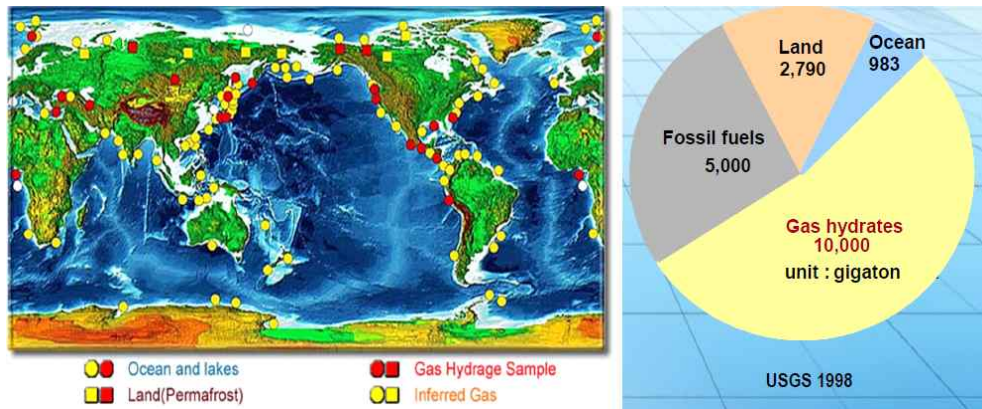


Fig. 2.2 Distribution map of gas hydrate and the hydrate resources over the world (허대기, 2005)

GH는 주 구성성분이 메탄으로 이루어져 있기 때문에 메탄하이드레이트라고도 하며 드라이아이스와 외관상 유사하여 불타는 얼음이라 불리기도 한다. GH 생산은 고체형태로 이루어지는 것이 아니라 온도를 올리거나 압력을 낮추어 가스를 해리시킨 후 파이프라인을 통해 생산하게 된다.

이러한 GH는 저온, 고압 조건을 만족하는 시베리아, 알래스카 등지의 영구동토지역이나 전 세계 수심 300m 이상의 심해저 퇴적층에 광범위하게 분포하고 있는데(Fig. 2.2), 이중 미국이 16%, 캐나다 5%, 일본 0.4%이다(주익찬, 2013).

GH에 포획된 메탄의 전 세계 추정량은 LNG 환산 톤 기준, 약10조 톤으로 전 세계에 매장된 화석에너지에 포함된 유기탄소량의 절반이상이며(Fig. 2.2) 전 세계가 5,000년 사용가능한 양(허대기, 2005)으로 세계원유, 가스, 석탄 부존량 합계의 2배 이상이고(Fig. 2.3), 풍부한 자원량과 경제성을 자랑하는 셰일가스 전 세계 자원량(16,112Tcf)에 비해 전 세계 GH 자원량은 747,506Tcf로서 약 46배의 자원량에 해당한다(Table 2.1).

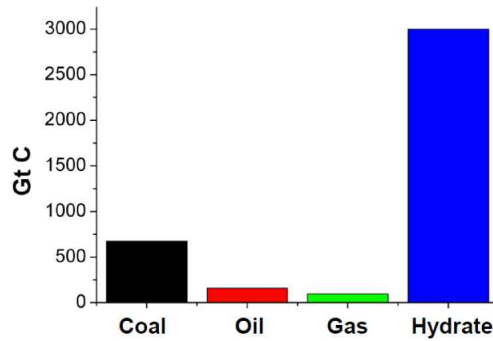


Fig. 2.3 Amount of organic carbons from energy sources (주익찬, 2013)

Table 2.1 Unconventional resources over the world (주익찬, 2013)

[Unit: Tcf]

Region	Tight Gas	Shale Gas	CBM	GH ^a	Total
북미	1,371	3,842	3,017	242,011	250,239
중남미	1,293	2,117	39	187,839	191,287
서유럽	353	510	157	30,229	31,248
중동부유럽	78	39	118	0	235
러시아	901	627	3,957	166,367	171,852
중동/북아프리카	823	2,548	0	7,557	10,927
사하라이남	784	274	39	15,150	16,247
중앙아시아/중국	353	3,528	1,215	15,150	20,244
태평양 OECD	705	2,313	470	60,494	63,981
기타 아태지역	549	314	0	7,557	8,419
남아시아	196	0	39	15,150	15,385
계	7,406	16,112	9,051	747,506	780,066

국내에서도 포항 동북쪽 135km 지점인 울릉분지에 약 6억 톤 이상의 GH가 매장되어 있을 것으로 추정되고 있으며 이는 현재 우리나라 연간 천연가스 소비량(2천만 톤)을 기준으로 약 30년간 사용할 수 있는 양이다(허대기, 2005).



Fig. 2.4 Ulleng basin with gas hydrate resources

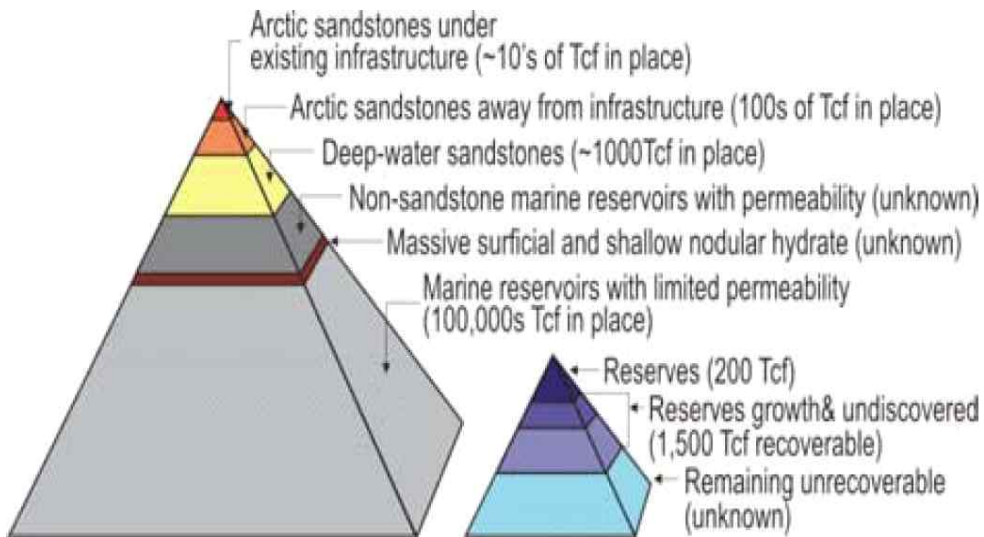


Fig. 2.5 GH resource pyramid (Kurihara et al, 2011)

대부분의 GH는 수심 400 m ~ 600 m 정도 되는 해저면 으로부터 약 100~200 m 이상의 해저 지하 퇴적층에 부존되어 있고 세계 추정 부존량의 20% 이상이 미국 알래스카를 포함한 연안지역에 매장되어 있다. GH 생산에 성공할 경우 미국은 현재 에너지 소비량 기준으로 백 년 동안 사용할 수 있는 에너지를 확보하게 된다.

(2) 특성 및 형태

GH 해리 시 1 m³의 고체 GH에서는 170 m³의 메탄가스와 약0.8 m³의 물이 발생된다(Fig. 2.6).

GH는 소정의 저온·고압(상평곡선의 상부)에서 형성된다(Fig. 2.7).

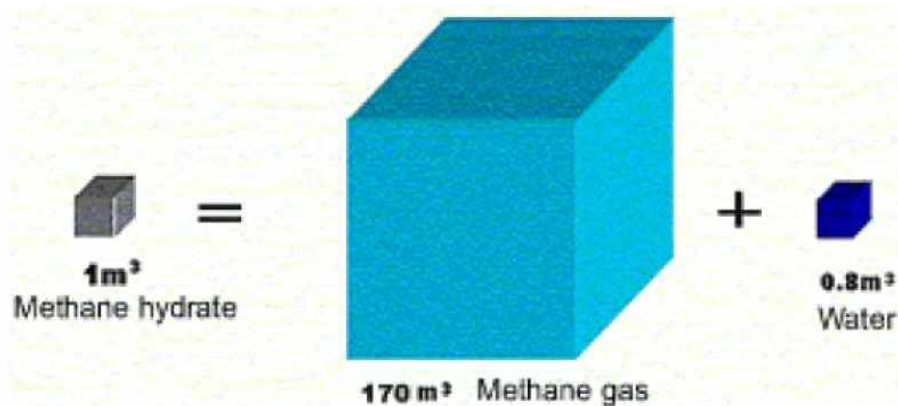


Fig. 2.6 Gas-Water Ratio of Methane hydrate (주익찬, 2013)

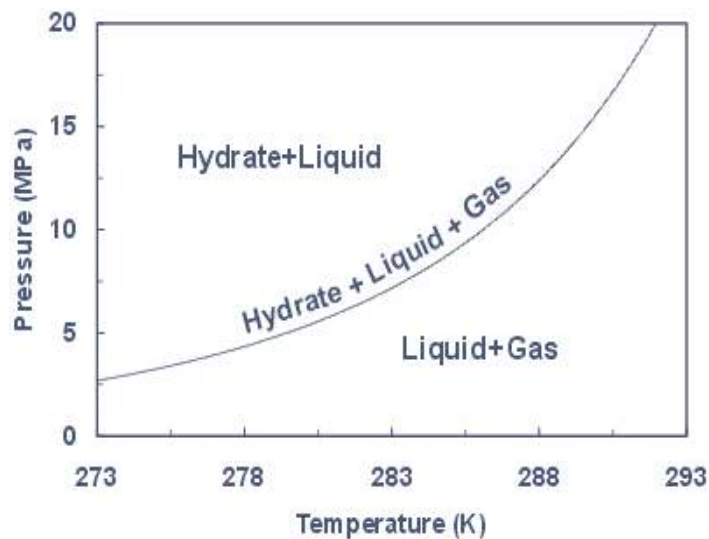


Fig. 2.7 Pressure versus temperature phase diagram for simple methane hydrate (Henriet et al, 1998)

또한 가스하이드레이트 안정 존(GHSZ: Gas Hydrate Stability Zone ;이하, GHSZ이라 함)은 해수 열 구배(hydrothermal gradient), 지열구배 (geothermal gradient), 가스하이드레이트 상 경계(gas hydrate phase boundary)에 대하여 온도 대 깊이(압력)로 표현된다(Fig. 2.8). 해수열 구배와 지열구배와 상 경계가 중복되는(빗금) 온도 압력 조건일 때 GH가 형성되며 자유가스구역(Free Gas Zone)에서는 자유가스가 포획된 것을 볼 수 있다(Fig. 2.8). 해수열 구배와 지열구배는 지리적 위치와 지체구조 (tectonic settings)에 따라 현저하게 다를 수 있다.

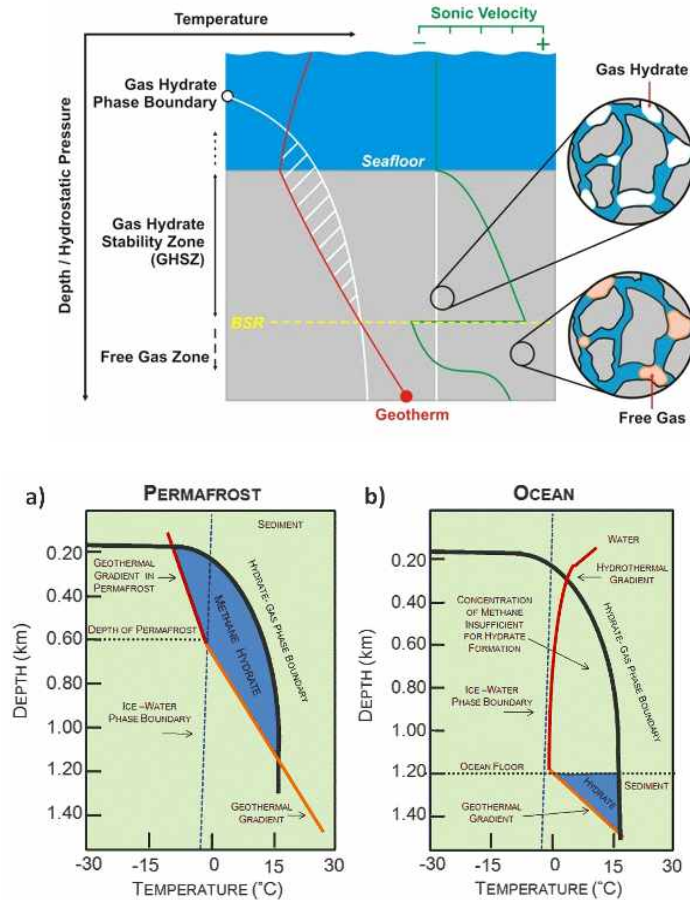


Fig. 2.8 Hydrate stability zone in subsea sediments (Henriet et al, 1998)

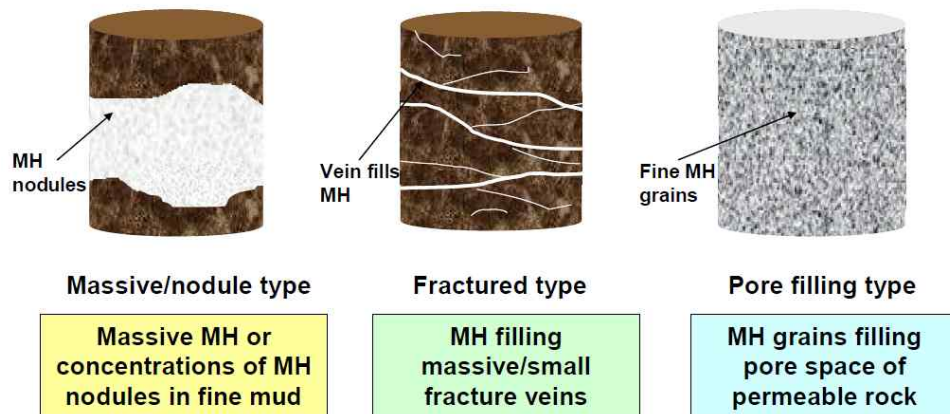


Fig. 2.9 Type of GH depositions (Kurihara et al., 2011)

여러 형태의 GH 광상(deposit)은 메탄과 물이 공존 하는 위치, 제공 되는 양에 따라 3가지 타입으로 분류된다(Fig. 2.9).

첫 번째는 단괴 타입(massive/nodule type)으로서 해저면에서 GH가 형성된 것으로 추정되는 덩어리 형태로 집적되어 있는 형태이다.

두 번째는 vein filling type으로서 fractures vugs에 GH가 형성되어 있는 형태이다.

세 번째는 pore filling type으로서 재래 석유나 가스의 전형적인 집적(accumulation) 형태로 사암이나 탄산염암과 같은 다공성 매체의 공극에 GH가 포유(contain)되어 있는 타입이다(Masnori et al., 2011). 3가지 형태 중에서 pore filling type은 GH가 해리되었을 때 지반침하가 상대적으로 적게 발생하고 안정적이어서 이 타입인 캐나다 Mallik site와 일본 Nankai Trough에서 시험생산이 완료되었고 울릉분지 시험 생산 및 상업생산 대상지도 pore filling type이 선정될 예정이므로 본 논문에서도 이 타입으로 가정하고 수치해석을 수행하였다.

Pore filling type의 가스하이드레이트 저류층(reservoir)은 GH와 자유가스와 자유 물(free water)의 존재 조건에 따라 3가지로 분류된다(Fig. 2.10).

Class 3 (confined GH reservoir)는 GHSZ에서 다공성 매체에 메탄가스가 충분히 제공되고 셰일 층과 같은 불투수성 층(impermeable layer)사이에 샌드위치 형식으로 되어있는 것이며 일본 Eastern Nankai Trough, Mallik site, Mt. Elbert 등에 매장되어 있는 형태이다.

Class 1 (reservoir underlain by free gas)은 다공성 매체에 메탄가스가 충분히 제공되는 상태에서 상부 층은 GHSZ에 해당하지만 하부층은 GHSZ 영역에 해당하지 않아 상부 층에는 GH가 형성되지만 하부층에는 자유가스가 집적되는 구조로서 러시아의 Messoyakha 필드와 알래스카의 Sagavanirktok이 이런 구조로 되어 있다.

Class 2 (reservoir underlain by free water)는 충분한 가스가 공급되지 않거나 Class 1의 자유가스 층의 가스가 사라지면서 자유 물(free water)층으로 되는 구조로서 Eastern Nankai Trough나 Mallik site의 GH 저류층 일부가 여기에 해당된다.

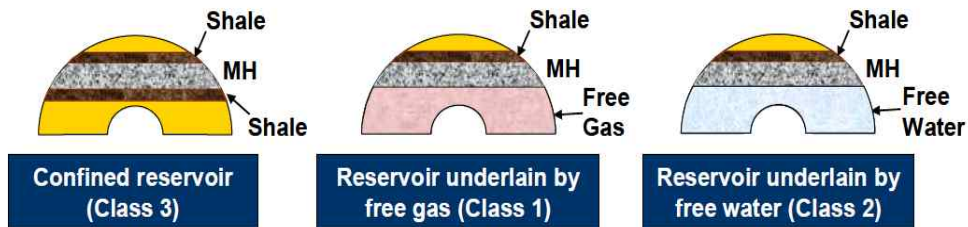


Fig. 2.10 Classification of pore filling type GH reservoirs (Kurihara et al., 2011)

(3) 에너지 · 환경 · 지질재해 측면의 중요성

① 에너지원 측면

첫째, 전 세계 가스하이드레이트에 포획된 유기탄소 양은 10조 톤으

로 화석에너지에 포함된 유기탄소의 2배(Fig. 2.2)로 매장량이 막대하고, 둘째, GH의 주성분인 메탄이 연소될 때 발생하는 이산화탄소의 양은 휘발유에 비해 0.7배 정도로 작아 환경 친화적인 특성을 가지고 있으며(Fig. 2.11), 셋째, 가스하이트레이트는 영구동토지역은 물론 심해저의 퇴적층에 광범위하게 분포되어 있고 특히, 해저 GH는 재래형 석유 및 천연가스에 비해 비교적 얕은 심도의 퇴적층에 부존되어 있다. 따라서 안전하고 경제적으로 GH를 생산할 수 있는 기술이 개발된다면 GH는 환경 친화적 에너지원으로 에너지 공급의 큰 비중을 차지할 것으로 예측된다(2005, 류병재).

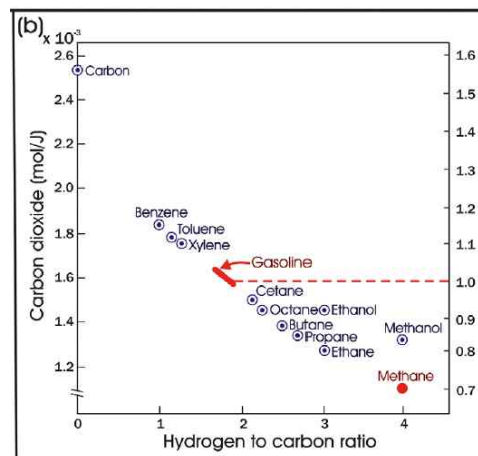


Fig. 2.11 CO₂ generation per unit of energy (류병재, 2005)

② 경제성 측면의 중요성

GH 지층의 아래 지층이 가스인지 물인지(Fig. 2.12)에 따라 경제성이 다르고 아직은 상업생산이 이루어지지 않아 정확한 판단은 힘들지만, 천연가스 판매 가격이 \$10/mmbtu 이상이 되어야 경제성이 있는 것으로 판단된다. 북미지역의 천연가스는 단기적으로 \$ 3~5/mmbtu 일 것으로 예상되어 북미지역에서 GH 생산비용이 더 하락해야 경제성이 있을 것으

로 판단된다. 그러나 일본과 한국 등의 극동아시아 지역의 천연가스 수입 가격은 \$14~16/mmbtu이므로 아시아에서는 GH 생산이 상대적으로 북미보다 경제적인 것으로 판단된다(주익찬, 2013).

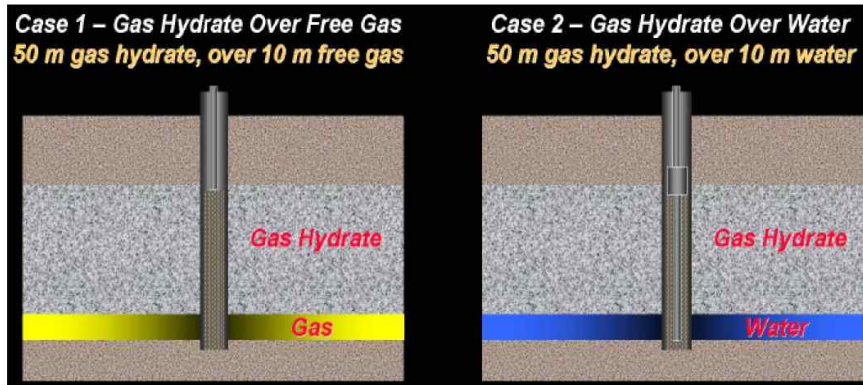


Fig. 2.12 Systems of gas hydrate layer (주익찬, 2013)

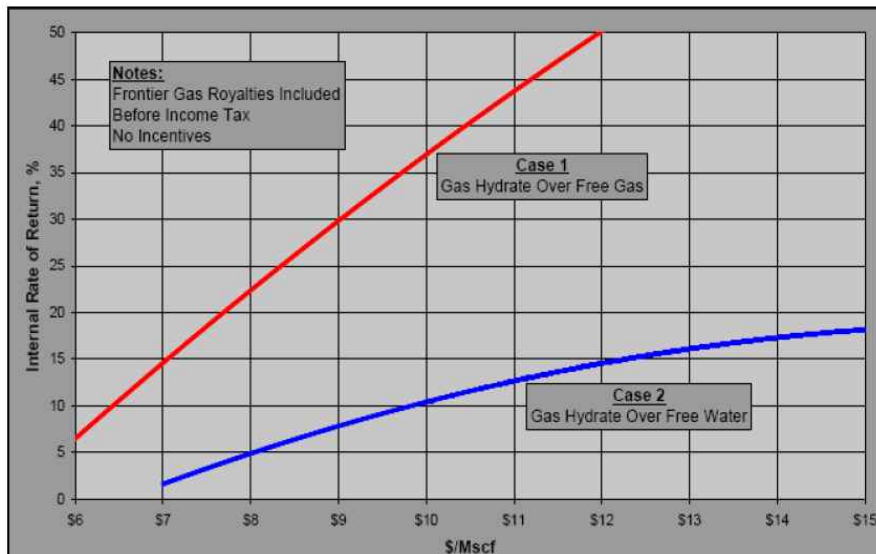


Fig. 2.13 Expected IRR (Internal Rate of Return) of production of gas hydrate along the systems of layers (주익찬, 2013)

③ 환경 및 지질재해 측면

온실효과 면에서 대기 중에 메탄이 1ppm 증가하는 것은 이산화탄소가 50ppm 증가하는 것에 상응할 정도로 환경에 대한 영향력이 매우 막대하다(Max et al. 1997). 과거 40만년동안 지구의 기후변동과 메탄 농도가 매우 밀접한 관계를 가지고 있다고 알려져 있다(Brooks et al., 1999).

영구동토지역과 심해에서 온실효과에 의한 자연적인 GH 해리나 천연가스 회수를 위한 GH 해리 시 지반침하에 의한 파이프라인(Fig. 2.14a)과 생산시설물의 손상 등(Fig. 2.14b)의 문제가 야기될 수 있다.

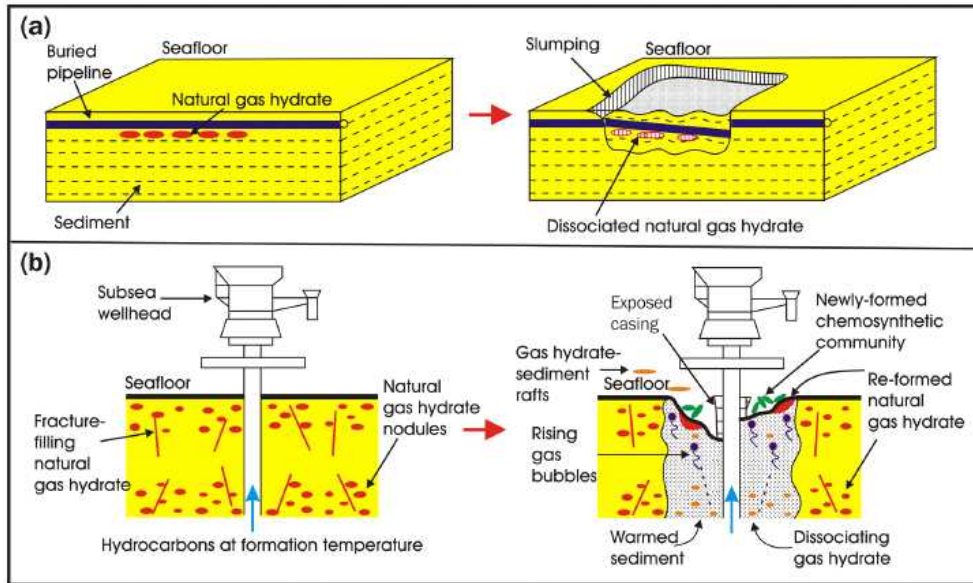


Fig. 2.14 Potential effect of natural gas hydrate dissociation on (a) pipeline and (b) production facility (류병재, 2005)

1700년대부터 현재까지 대기에 포함된 이산화탄소와 질소의 농도는 그리 많이 증가하지 않았지만 메탄의 농도는 산업혁명이 일어난 18세기 후반에 비하여 2배 이상 증가한 상태이다(Fig. 2.15a).

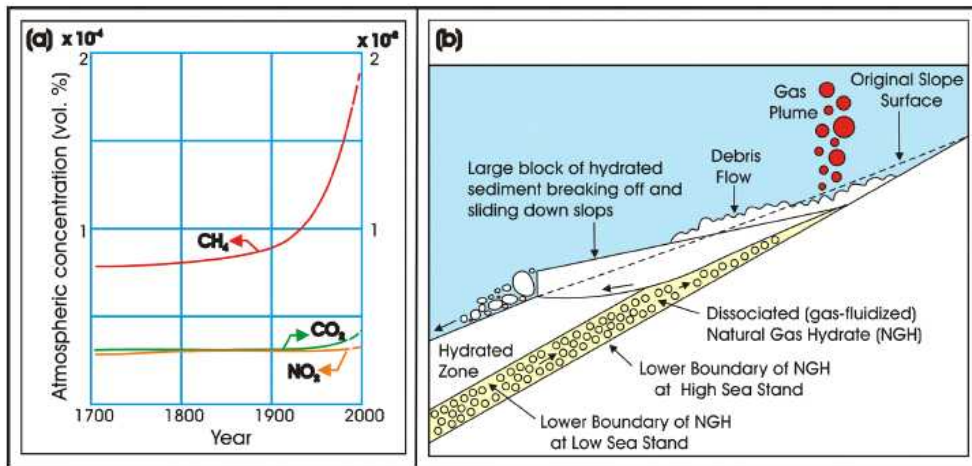


Fig. 2.15 (a) Change in atmospheric content of CH_4 , NO_2 , and CO_2 between 1700 and 1900, and (b) slide slumping caused by methane hydrate dissociation (류병재, 2005)

대서양 대륙주변부에서의 연구에 의하면 약 5° 이하의 경사를 가진 해저 사면은 안정적이어야 함에도 불구하고 해저 사면붕락(slide slumping)의 흔적들이 많이 발견되는데 이는 빙하기동안 해수면 하강에 따른 압력감소로 인해 GH가 해리되었기 때문인 것으로 해석되었다(Fig. 2.15b). 특히, 해저사면 붕괴가 대규모일 경우 지진으로 발생하는 '츠나미'와 같은 해일이 발생하여 연안지역에 피해를 입힐 수 있다. 이런 측면에서 볼 때 GH에 대한 세 번째 관점이 인간에게 가장 직접적이고 긴박한 문제이다.(Kvenvolden, 2000)

2.1.2 가스하이드레이트 생산회수 기술

(1) 생산회수 방법

생산회수 방법은 크게 3가지로 나누어져 있으며(Fig. 2.16) 그림에서와 같이 열주입 및 억제제 주입법은 상기한 Class3 (confined reservoir)에 주로 사용되는 방법이며 감압법은 상기한 Class2 (reservoir underlain by free water)에 주로 사용된다. 이하, 각 회수방법별로 상세하게 설명한다.

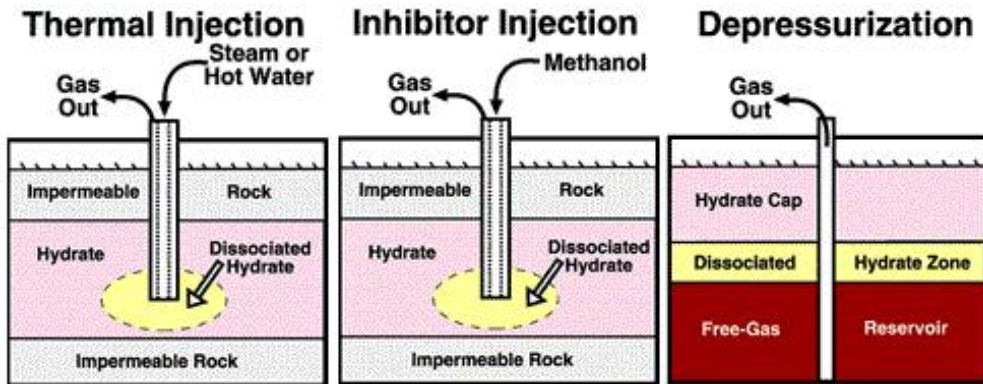


Fig. 2.16 Main production method of gas hydrate (이정환 등, 2009)

① 감압법(depressurization)

감압법은 Fig. 2.16 우측 그림과 같이, GH와 인접한 자유가스층에 시추공을 삽입하고 가스층의 압력을 감소시키는 방법으로 자유가스층의 압력감소로 GH 층의 GH가 해리된다. 해리 시 흡열반응이 수반되어 주변의 온도가 하강하게 되어 GH 재형성의 원인이 되기도 한다. 그러나, 적절한 속도로 GH의 해리가 진행된다면 단열 팽창에 의해 저류층이 냉각되며 주변으로부터 열이 유입되어 더욱 해리를 촉진시킨다는 것이 밝혀지기도 했다. Collett(2000)는 GH가 해리될 때 일어나는 흡열반응에 의해 물이 얼거나 GH가 다시 형성되어 생산을 방해하는 현상이 일어날 수 있다고 보고하였다(한국지질자원연구원, 2010).

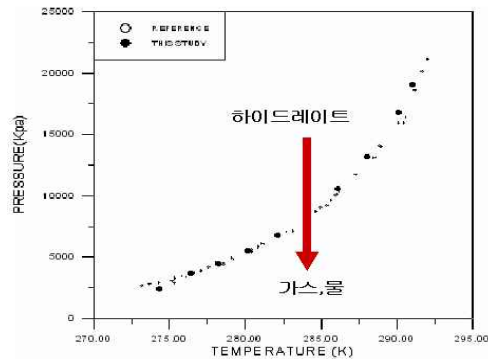


Fig. 2.17. Phase boundary of methane gas hydrate (한국지질자원연구원, 2010)

저류층의 압력이 Fig. 2.17과 같이 평형압력 이하로 내려가면 GH는 주변으로부터 에너지를 흡수하여 해리되기 시작하고 저류층의 온도 또한 내려가게 된다. 이로 인해 지층 내에는 온도구배가 발생되며 주변으로부터 GH 해리지역으로 열이 이동하게 된다. 계속된 감압을 통하여 지층의 압력이 평형압력이하의 불안전 영역에 도달할 때까지 계속하여 해리가 진행된다.

GH가 해리되면 GH 포화도가 감소하고 유체 유효투과율이 현저하게 증가하여 저압이 전 보다 용이하게 생산성 주변으로 전달되어 해리를 촉진시켜 가스가 생산된다(Kurihara et al., 2011). Fig. 2.18는 감압법에 의해 GH를 해리할 때의 모사도로, 압력이 떨어짐에 따라 GH상태에서 가스 상태의 조건으로 전환되고 있음을 보여주고 있다.

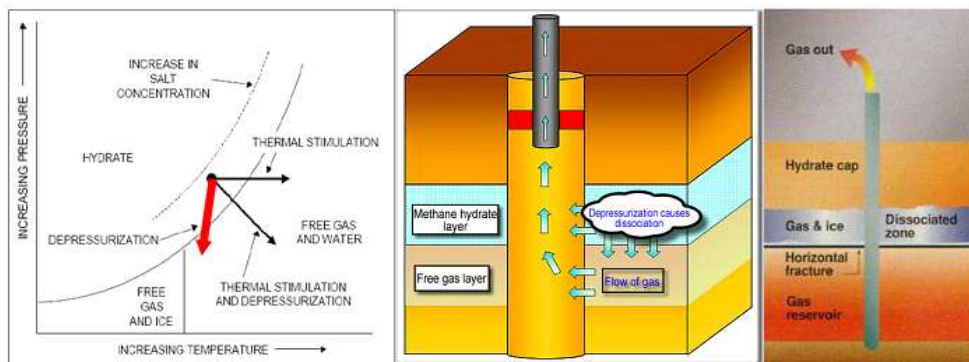


Fig. 2.18. Production method using depressurization (한국지질자원연구원, 2010)

② 열 또는 열수 주입법

열주입법은 증기 또는 열수를 주입해서 GH 저류층의 온도를 올리고 GH를 해리시켜 가스를 생산하는 방법으로서, Fig. 2.19와 같이, GH에 인접한 free gas층이 없을 때 고려되는 방법이다. 저류층 내 공극의 용적을 증가시키기 때문에 증기를 반복해서 주입하는 것이 필요하다.

열 주입법의 단점은 주입된 열이 GH가 부존된 저류층까지 도달하는 동안 주위의 층으로 빠져나간다는 점이다. 이 열 손실은 많게는 전체 주입된 양의 75%에서 적게는 10%를 차지하고 있다. Fig. 2.19는 열자극법에 의하여 메탄가스를 생산하는 모사도로, 관내로 뜨거운 열수 및 증기를 주입/회수함에 따라, 해리를 통해 메탄가스가 발생됨을 나타내고 있다.

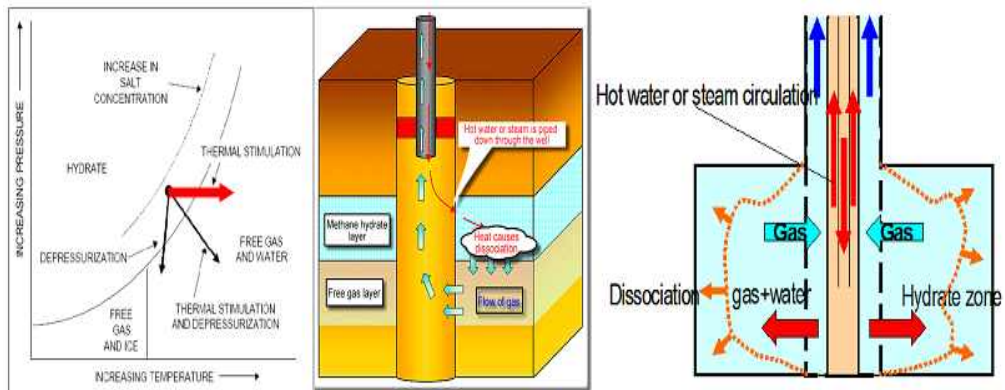


Fig. 2.19. Phase boundary of methane gas hydrate. (한국지질자원연구원, 2010)

③ 억제제 주입법(Inhibitor injection)

억제제 주입법은 액상의 억제제를 주입하여 GH의 평형곡선 위치가 옮겨지게 만드는 방법으로, 억제제를 주입하면 Fig. 2.20과 같이 평형압력이 올라가고 평형온도가 내려가게 되어 그 조건에서 GH가 해리되기 시작한다. Massoyakha field의 경우 메탄올을 주입한 가스정에서는 그렇

지 않은 가스정에 비해 가스 생산이 최대 4배 증가하였음을 보여주었다 (Makogon, 1997). 이와 같은 억제제의 주입은 오래 전부터 추운 지역에서 PNG (Pipeline Natural Gas)내의 가스가 유동할 때 형성된 GH에 의해 파이프라인이 막히는 것을 방지하기 위해 사용된 방법을 응용한 것이다. 그러나 이 방법은 환경오염과 함께 다량으로 필요한 용매의 가격이 큰 문제가 된다.

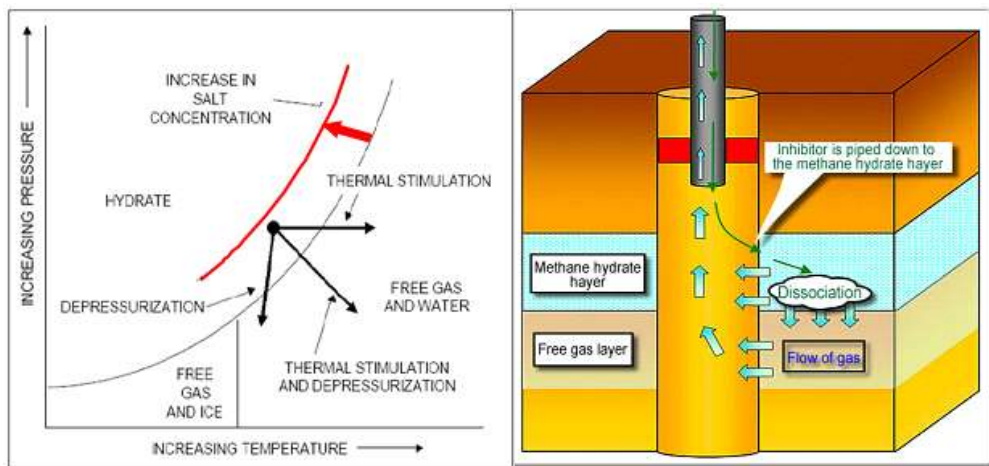


Fig. 2.20 Inhibitor injection method. (한국지질자원연구원, 2010)

④ 치환법(replacement Method)

GH 내부의 메탄을 이산화탄소 및 질소 등 가스로 치환하는 방법으로서, 종래의 회수 방법보다 높은 수율로 회수할 수 있을 뿐만 아니라 기후변화 주범인 이산화탄소 문제를 해결할 수 있고 지층의 안정화를 추구할 수 있는 방법이지만, 치환반응 속도가 늦다는 점과 재형성된 이산화탄소 GH가 유체유동을 막을 수 있어 더 많은 보완 연구가 필요하며 비 경제적이다. Fig. 2.21은 GH층에 CO₂ 를 공급해서 GH 내부에 갇혀 있는 메탄을 치환하는 과정을 보여주는 그림이다.

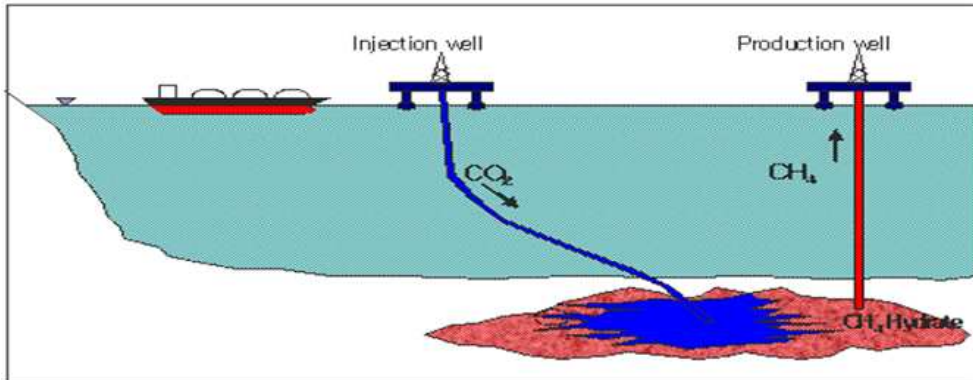


Fig. 2.21 CO₂ Replacement Method. (한국지질자원연구원, 2010)

(2) 감압법으로 회수생산시 발생 현상 (Kurihara et al., 2011)

Fig. 2.22는 감압법 적용 시 수치해석 시뮬레이션으로 예측한 GH 저류층에서의 GH 포화도의 변화를 보여주는 단면도이다. Fig. 2.22의 (1)단계에서 감압법이 실시되자마자 생산정 부근의 GH가 해리되기 시작하면서 단열팽창으로 온도가 떨어지고 열 구배에 의해 상하부에서 열이 전달되어 그 인근에서부터 해리가 시작된다. Fig. 2.22의 (2)단계는 유효투과도가 증가하면서 압력전달이 보다 용이하게 되고 상하부 경계부근으로 해리 구역이 확장되는 것을 나타낸다. Fig. 2.22의 (3)단계에서 상하부 경계까지 GH가 해리되고 감압이 가속되어 가스 생산이 급속하게 증가한다. Fig. 2.22의 (4)단계까지 가스 생산율이 증가하다가 최정점에 이르게 된다. Fig. 2.22의 (5)단계에서는 외부로부터의 열전도에 의해서만 해리가 되고 가스 생산율이 일정해진다.

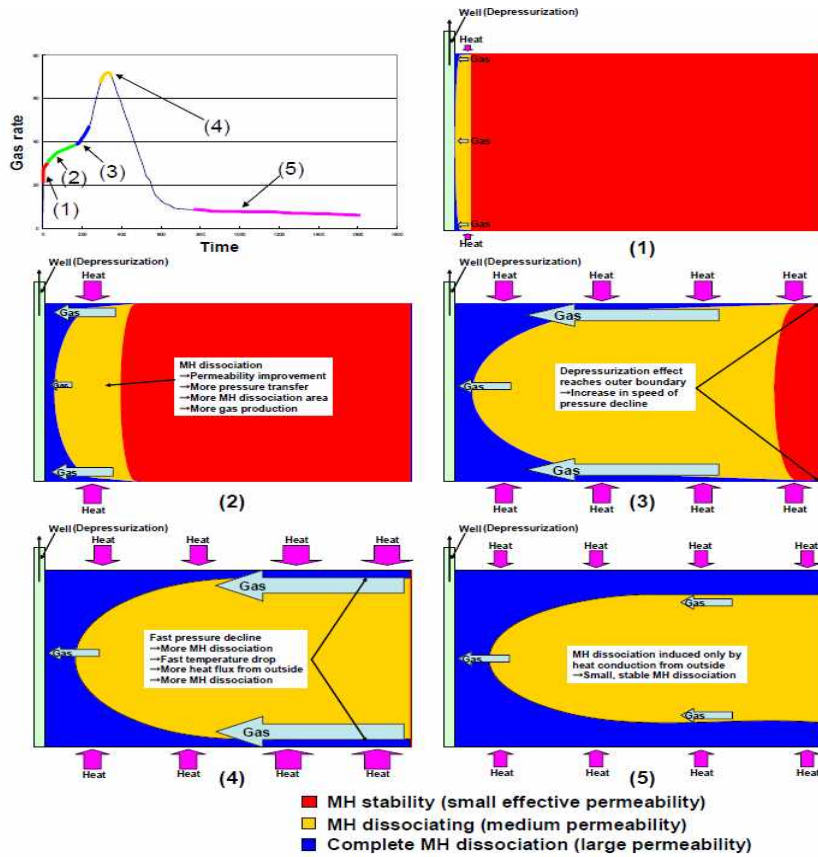


Fig. 2.22 Mechanism of GH dissociation by depressurization with multiple wells (Kurihara et al., 2011)

Kurihara et al.(2011)은 또한 민감도 분석 수치해석 결과 가스하이드레이트층의 두께, 초기온도, 절대 투과율, 초기 유효투과율 등의 물성이 목표생산기간(8년)동안의 누적 가스 생산에 영향을 미친다고 하였다. 저류층 초기 온도가 높을수록 더 많은 열을 GH 해리에 소비할 수 있으므로 보다 많은 가스 생산이 가능하다(Fig. 2.23).

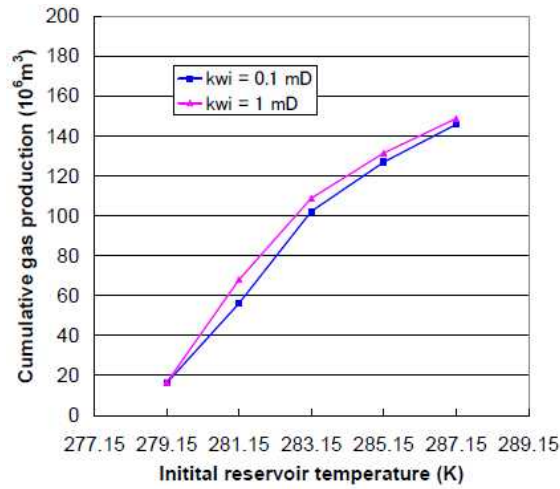


Fig. 2.23 Effect of initial temperature on gas production (depressurization: $K_a = 500 \text{ mD}$, Kurihara et al., 2011)
 ※ K_a : absolute permeability, K_{wi} : effective permeability

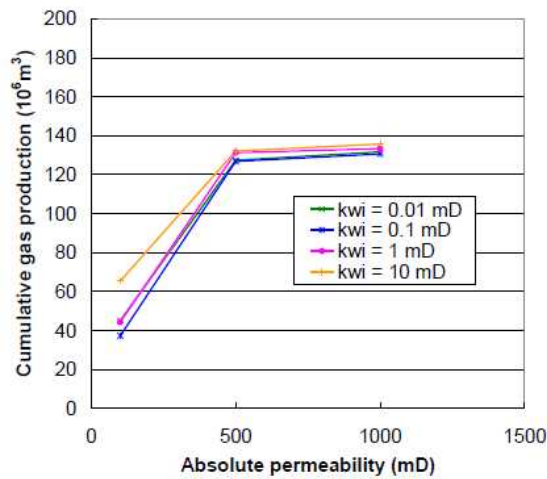


Fig. 2.24 Effect of permeability on gas production (depressurization: $T = 285.15 \text{ K}$, Kurihara et al., 2011)

높은 저류층 투수율은 압력전달을 향상시켜 GH 해리를 촉진시킨다.
 절대투수율이 임계치보다 작은 경우는 목표생산기간(8년) 동안 압력이

전달되지 않는데 임계치보다 절대 투수율이 높으면 목표 생산 기간 동안 누적 가스 생산이 완만하게 증가된다(Fig. 2.24).

투과율 및 초기온도이외에 초기 압력, 열전도도 같은 파라미터는 GH 해리와 가스 생산에 비교적 적은 영향을 미친다(Kurihara et al., 2011).

(3) 감압법 적용의 타당성

Saeki et al.(2008)은 수치해석 모사를 통해 다양한 생산회수방법으로 목표생산기간(8년) 동안 생산 실적을 예측하였다. 그 결과 Fig. 2.25과 같이, 열사용법(thermal method) 특히, 고온수 주입 및 다단(huff and puff) 열주입 방법을 이용하는 경우 누적 회수량이 가장 많았고 감압법과 감압법·생산정 히팅법의 경우 가스 생산률과 누적 회수량이 거의 유사하였다.

하지만, 에너지 효율 측면에서는 Fig. 2.26과 같이 감압법이 가장 우수 하였고 열사용법이 가장 비효율적인 것으로 분석되었다.

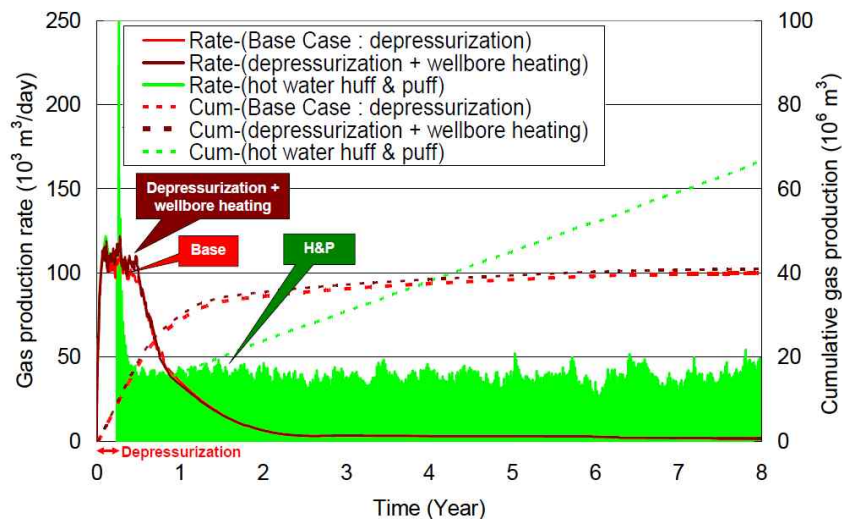


Fig. 2.25 Example prediction results for Well-B in the Eastern Nankai Trough (Kurihara et al., 2011)

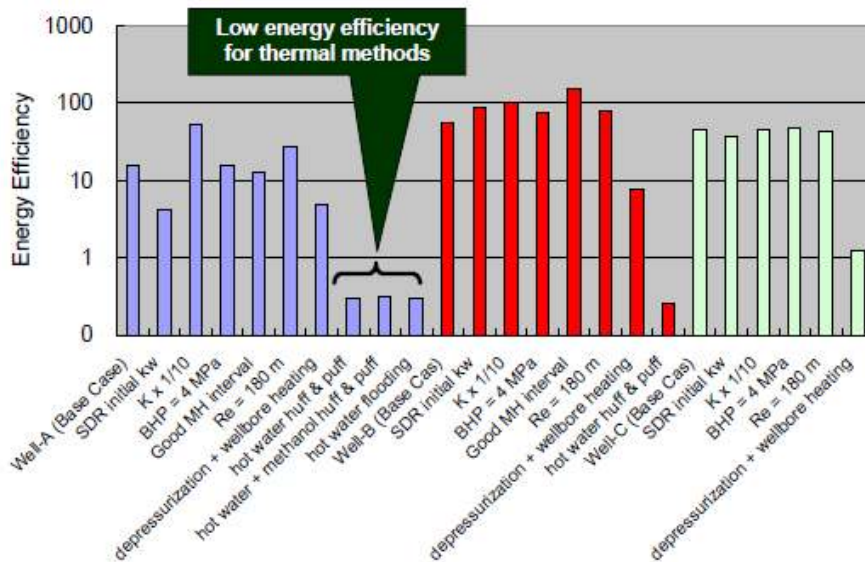


Fig. 2.26 Example calculation results for energy efficiency (Kurihara et al., 2011)

※ Energy efficiency: ratio of energy produced to that consumed

2002년 캐나다 Mallik site에서의 현장생산 이전에는 GH의 초기 유효 투수율이 극도로 작아서 감압법으로 GH를 해리하는 것이 불가능하다고 생각하였지만, 시험결과를 분석한 바 MH 21 컨소시엄은 심지어 GH 포화도가 80% 만큼 높은 GH도 유체유동이 가능하다고 밝혔다. 이 발견이후, 많은 연구자들이 감압법을 이용한 해리 및 생산을 중점적으로 연구하고 있다. 감압법보다 월등히 좋은 회수방법은 아직까지 발견하지 못하고 있다.

Fig. 2.27은 투수율과 온도에 따라 가스 생산만의 관점에서 보았을 때 가장 적합한 방법을 나타낸 그림이다. 높은 투수율을 가진 GH 저류층에서는 열 사용방법(hot water flooding, hot water huff and puff)이 감압법보다 많은 양의 가스를 회수하는 것으로 보이지만 경제적인 관점에서는 적용하기 어렵다. 따라서 GH가 비교적 쉽게 해리 가능한 저류층

에서는 감압법을 강력하게 추천할만하다(Kurihara et al. 2011).

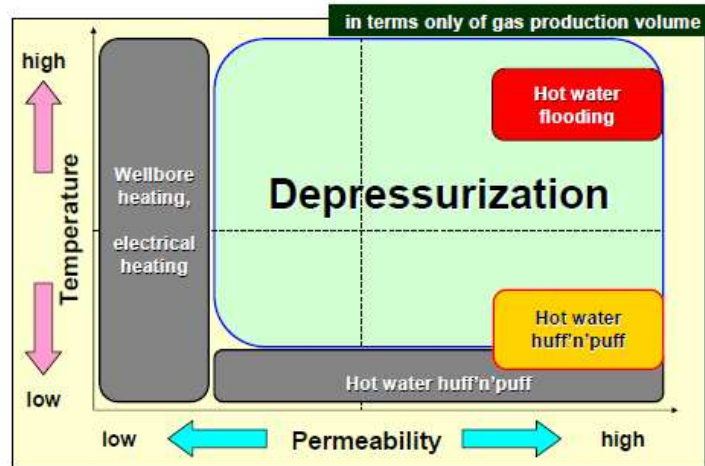


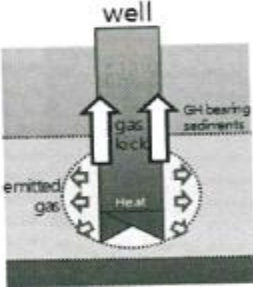
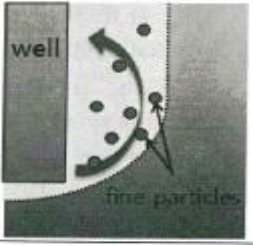
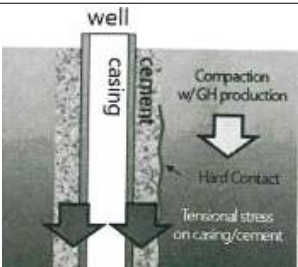
Fig. 2.27 Application of GH dissociation and production methods in terms of reservoir permeability and initial temperature (Kurihara et al., 2011)

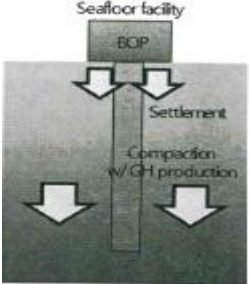
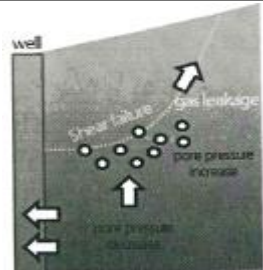
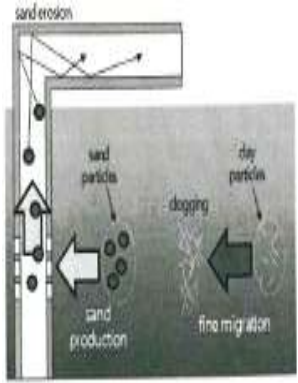
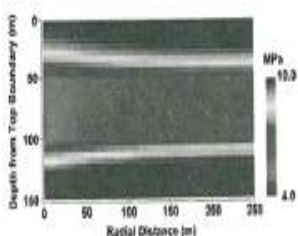
(4) 시험 시추 공정계획 시 예상 문제점(지식경제부, 2012)

생산정의 라이프 사이클 내에서 발생할 수 있는 문제는 개략적으로 다음과 같이 4가지 과정으로 요약할 수 있다.

Table 2.2 Problems of life cycle in production well

과정	예상문제	요 약	
굴진	Bit balling		점토 등이 드릴비트에 엉겨 붙어 능률 감소

굴진	시추중 GH 열해리	 A cross-sectional diagram of a well. At the bottom, a circular area labeled 'Heat' is surrounded by 'GH bearing sediments'. Arrows point upwards from the heat area, with one arrow labeled 'gas lock' and another labeled 'emitted gas'.	굴진 시 비티에서 발생하는 열 및 심 심도에서 생산정을 통해 전도된 열에 의해 GH가 해리, 발생한 가스가 시추공 내에서 킁(kick)유발
	과도한 이수압력으로 인한 확공	 A cross-sectional diagram of a well. A large arrow points downwards from the well, labeled 'mud fluid'. The well is shown as a vertical cylinder.	과도한 이수압력으로 인해 연약지반이 지나치게 침식되어 시추공이 확공되고 안정성 저하
	점토로 인한 이수 성능변화	 A cross-sectional diagram of a well. A curved arrow points from the well into the surrounding area, labeled 'fine particles'. The well is shown as a vertical cylinder.	굴진 시 발생한 점토/실트 광물이 이수와 혼합되어 이수 밀도와 점도에 영향을 끼침
완결	시멘트-지반 접촉면 교란	 A cross-sectional diagram of a well. The well is labeled 'well' and contains 'casing' and 'cement'. An arrow points downwards from the casing, labeled 'Compaction w/ GH production'. Another arrow points upwards from the casing, labeled 'Disturbed Contact' and 'gas leakage'.	GH 생산 시 지반이 침하됨에 따라 시멘트-지반 접촉면이 교란되고 이를 따라 가스 누출
	생산정에 대한 인장응력 발생	 A cross-sectional diagram of a well. The well is labeled 'well' and contains 'casing' and 'cement'. An arrow points downwards from the casing, labeled 'Compaction w/ GH production'. Another arrow points upwards from the casing, labeled 'Hard Contact' and 'Tensional stress on casing/cement'.	GH 생산 시 지반이 침하됨에 따라 시멘트 및 케이싱에 인장응력이 부하되고 균열발생

	<p>해저구조물 침하 및 부등침하</p>	 <p>The diagram shows a seabed facility with a BOP (Bottom Operating Point) at the top. Below it, arrows indicate 'Settlement' and 'Compaction w/ GH production'.</p>	<p>GH해리시의 지반 압축으로 해저구조물의 침하 및 부등 침하 발생</p>
<p>생산</p>	<p>공극압 증가로 인한 지반 전단 파괴</p>	 <p>The diagram shows a well with arrows indicating 'shear failure', 'gas leakage', and 'pore pressure increase'.</p>	<p>GH해리시 해리된 가스의 부상으로 생산대상층 상부지층의 공극압력이 증가하여 전단파괴 및 가스 누출 유발</p>
	<p>s a n d production/ f i n e migration</p>	 <p>The diagram shows sand production and fine migration. Labels include 'sand erosion', 'sand particles', 'sand production', 'fine migration', 'clogging', and 'clay particles'.</p>	<p>Sand production: 모래입자 이동으로 생산정주변의 침식과 파이프내부순상 fine migration: 점토/실트입자가 clogging을 일으켜 지반 투과율이 감소 생산성저감</p>
<p>폐공</p>	<p>생산대상층의 온도/압력 회복</p>	 <p>The graph shows Depth from Top Boundary (m) on the y-axis (0 to 180) and Radial Distance (m) on the x-axis (0 to 250). A color scale on the right indicates pressure in MPa (4.0 to 10.0).</p>	<p>폐공이후 생산 대상층의 온도와 공극압력이 회복되면서 유효응력 감소로 추가적인 지반 불안정화를 겪을 수 있음</p>

이 논문에서는 시멘트-지반 접촉면 교란으로 인한 가스누출, 해저구조물 침하, fine migration을 유발 시킬 수 있는 지반 침하에 대하여 기술하고자 한다.

2.1.3 가스하이드레이트 기술개발 현황

(1) 국내 가스하이드레이트 기술개발 현황

2004년 6월 산업자원부 주도로 3단계 10개년 “가스하이드레이트 자원개발 사업 기본 계획”을 수립하고, 1단계(2005~2007) 사업에서 동해안 GH 부존을 확인하였고 회수생산 기술 분야에서는 실험실 시험장치를 이용한 감압법, 억제제 주입법, 열자극법 등과 배가스 치환법을 통한 GH 회수생산 실험을 수행하여 국내 GH 생산법에 대한 기초기술을 확보할 수 있었다. 국내 실내실험의 한계성으로 실제현장 시험생산 기술 및 기법 연구의 필요성이 요구됨에 따라 IODP, 미국, 일본, 인도 등의 전문가와 연구 및 정보공유를 지속적으로 추진하여 1단계 사업 결과로 2007년 11월 동해안에서 심해저 심부 가스하이드레이트 부존지역 코어링을 통하여 GH 실물 채취에 성공하였고 부존량은 8억 톤 정도로 추정되었다.

2단계 사업(2008~2011)에서 지식경제부, 가스하이드레이트 사업단을 주축으로 한국가스공사, 한국지질자원연구원, 한국 석유공사 등 출연기관과 서울대, 카이스트, 한양대, 해양대 등 국내 산학연과 해외 LBNL, PNNL 등 학교 및 기관에서도 GH 개발 생산관련 공동 연구를 수행하였고 그 결과로 부존량을 종합적으로 재평가하여 울릉분지 샌드층에만 6억 톤이 부존된 것으로 평가하였으며 시험 생산 후보지 선정을 위한 연구가 수행되었다.

3단계 사업(2012~2014) 에서도 2단계 수행기관이 연속적으로 과제를 수행하고 있으며 시험생산을 최종 목적으로 1, 2 단계에서는 거의 수행되지 않았던 환경평가를 수행하고 있다. 이는 GH 회수생산시 해저면의

변화 및 침하, 바다 속 환경 및 대기환경에 어떤 영향을 미칠 수 있는지 파악하여 '15년 시험생산 시 발생 가능한 문제점을 사전에 예방하고자 하는 것이다

(2) 주요국가 가스하이드레이트 기술개발 현황

① 미국

전체 가스하이드레이트 개발 사업은 미국 DOE(Department of Energy)가 주관하고 있으며, 육상시험생산에서는 BPXA(BP Exploration Alaska)와 공동으로 알라스카(ANS: Alaska North Slope) 프로젝트에서 수행해왔고, 해상에서는 Chevron을 주축으로 JIP(Joint Industry Project)를 구성하여 멕시코만(GOM: Gulf of Mexico)에서 가스하이드레이트와 관련된 프로젝트를 수행하고 있다.

DOE/FE(Department of Energy/Fossil Energy)의 “국가 다개년 MH 연구개발 프로그램 계획(National Methane Hydrate Multi-Year R&D Program plan)” 수립 후 “MH R&D Act; S.1418”이 2000년 5월 미국 의회에서 승인되었고 2001년 시작되어 2001년~2011년간 23,600만달러가 투자되었다. 미국정부는 2006년 7월 “MH R&D 로드맵(Interagency Roadmap for MH R&D)”을 시작하였고 GH 상업생산 시점을 ANS 등 육상의 경우 2015년, GOM(Gulf of Mexico) 등 심해의 경우 2025년으로 수정하였다.

최근 미국은 GH 연구 프로젝트를 위해 다른 나라들과 협력하고 있다. 2006년에는 DOE와 USGS는 인도가 인도양에서 로깅과 코어링을 할 수 있도록 기술적인 지원을 했고, 2007년에는 중국 남해와 한국의 울릉 분지에 로깅과 코어링 조사에 참가하였다. 2009년 JIP LegII 프로젝트팀

은 GOM에 Walker Ridge Block 313 등 2곳에서 시추 및 로깅으로 얻은 데이터를 통해 GH가 저류층에 있음을 확인하였다.

2008년 DOE는 ConocoPhillips와 Prudhoe Bay에서 온실효과의 주범인 CO₂를 MH와 치환하고 지반침하를 방지할 수 있는 CO₂ 치환법 시험을 시작하였고 최근 2012. 2. 15 ~ 4. 15까지 CO₂ 치환법으로 시험 생산하였다. 이 시험을 통해 이산화탄소와 질소 혼합가스를 GH에 주입하면 천연가스 생산이 촉진되는 것을 보여주었다.

② 일본

일본 경제산업성(Ministry of Economic Trade and Industry, METI)은 GH 상업생산 기술 확보를 위해 "MH21"프로젝트를 2001년부터 2018년까지 연간 약100억 엔 이상의 개발비를 투자하여 2018년까지 상용화기술을 개발한 후, 2023~2029년에 상업생산을 시작할 예정이다.

일본은 세계최초로 GH 해양생산 시험에 나섰다. 일본 근해의 자원으로 생산기법의 적용성을 확인하기 위해 자원의 존재가 확인되어 있는 Nankai Through에서 제1회 해양산출시험을 시행하였다. 이 시험은 2012년과 2013년 2년에 걸쳐 이루어지고 2012년에는 우선시험에 쓰일 생산정을 굴착하는 동시에 시험장소의 지층에 관한 데이터를 취득하였다. 계속하여 2013년 3월에 2주간의 계획으로 생산시험을 실시하였다. 하지만 기상 여건 등으로 계획보다 1주 앞당겨 생산시험(3.12~3.18)이 끝났다. 제1회 해양산출시험의 결과에 따라 더욱 장기의 제2회 해양 상출 시험을 행할 것을 검토 중이다. 해양시험의 주된 목적은 1) 일본 주변해역의 실제현장의 조건(지질, 온도 등)에서 생산거동 확인(감압법에 의해 GH에서 가스를 생산할 수 있는지를 실증하고 생산성을 확인함) 2) 생산정 안정화 기술 확인(시멘트에 의한 Zone Isolation 등) 해양에서의 생산시스템(생산정 마무리 · 생산기기 등)의 실증의 2가지이다.

③ 캐나다

가스하이드레이트 에너지 잠재력에 대한 사업 활성화는 1997년 이후 집중적으로 이루어진 캐나다 Mackenzie Delta 지역 Mallik project에서 부터 비롯되어 과학 연구 목표를 확대하였다. 2차례의 성공적인 Mallik 프로젝트는 현장시험 생산 프로젝트로서 캐나다 지질 조사소(GSC)와 일본 JOGMEC가 사업을 주도하였고 천연 GH로부터 천연가스를 시험 생산한 유일한 프로젝트이다. 현재 캐나다 동쪽에 있는 뉴펀들랜드 래브라도(Newfoundland and Labrador)에서 2010년부터 2014년 까지 Flemish Pass Basin 등의 지역에 대한 GH 연구 프로그램이 진행 중으로 1단계 목적은 이 지역에서 이전사업과 데이터 검토를 통해 가스하이드레이트 퇴적층의 구조와 특성을 파악하는 것으로써 NL(Newfoundland and Labrador) GH 프로젝트의 1단계 결과는 GH 샘플을 얻기 위한 궁극적인 목표에 대한 준비 작업이 될 것이다.

2.2 가스하이드레이트 해리에 관한 주요 이론 및 물성

2.2.1 압밀(consolidation)이론 및 삼축 압축 시험

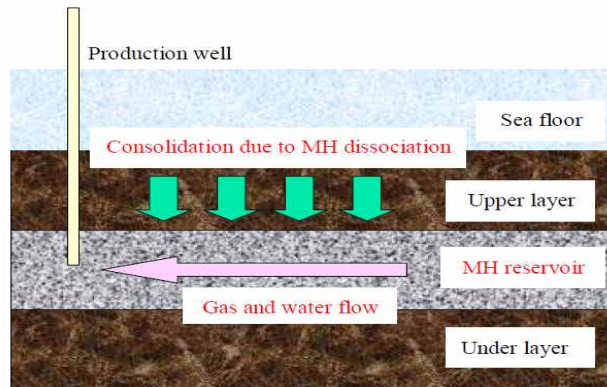


Fig. 2.28. Schematic illustration for consolidation of subsea ground and flow of gas and water during GH dissociation

Sakamoto et al.(2008)은 감압법으로 공극수압이 감소함에 따라 유효 응력이 증가하고 오버버든(overburden)에 의해 가스하이드레이트 퇴적층(sediment)에 압밀(consolidation)이 발생하면 투수율과 공극률이 감소하여 결과적으로 가스 생산성이 떨어진다고 주장하였다(Fig. 2.28)

이에 따라 압밀이론 및 삼축 압축 시험에 대하여 간략히 기술한다(Braja, 1998).

(1) 압밀(consolidation) 이론

흙의 압축은 a) 토립자의 변형 b) 토립자의 재배열 c)공극으로부터 물이나 공기가 빠져나옴으로써 발생한다.

일반적으로 하중에 의한 지반 침하는 크게 세 분야로 나뉜다. ① 탄성 침하(elastic settlement)는 건조토, 불포화토, 포화토가 함수비의 변화 없이 탄성변형 때문에 일어나는 침하이다. 탄성침하량은 탄성이론에 의해 유도된 방정식을 기본으로 한다. ② 1차 압밀 침하(primary consolidation settlement)는 포화점토에서 공극을 채우고 있는 물이 빠져나감으로써 발생하는 침하이다. ③ 2차 압밀침하(secondary consolidation settlement)는 포화점토에서 발생하는 침하로 토립자의 소성정렬(plastic adjustment)의 결과이며 일정 유효응력 하에서 발생하는 압축의 한 형태이다.

포화점토층에서 시간에 따른 변형특성을 Terzaghi의 압밀모형(Fig. 2.29)을 고려함으로써 가장 잘 이해할 수 있다.

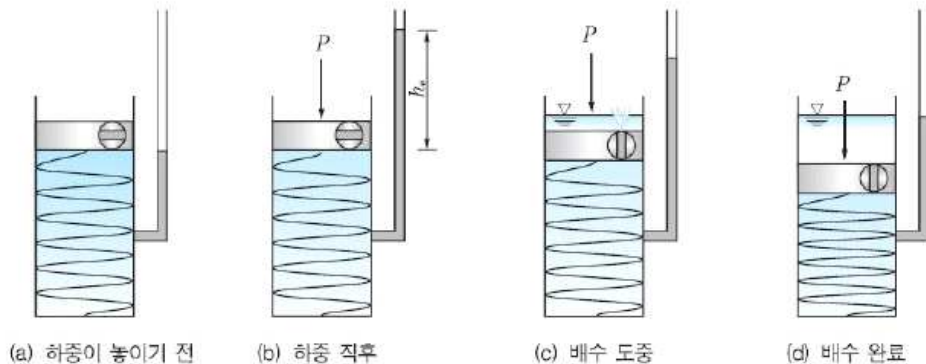


Fig. 2.29 Spring-cylinder model (modified from Braja, 1998)

실린더 내부면적을 A 라고 했을 때 Fig. 2.29(a)와 같이 실린더는 물로 채워져있고 마찰이 없는 수밀성의 피스톤과 밸브를 갖고 있다. Fig. 2.29(b)와 같이 피스톤에 하중 P 를 가하고 밸브를 닫으면 물이 비압축성이므로 전하중은 실린더 내에 있는 물에만 전달되고 스프링에는 어떠한 변형도 일어나지 않는다. 이때 과잉공극수압은 $\Delta u = \frac{P}{A}$ 이 된다. 여기에

서 $P = P_s(\text{스프링에 전달하는 하중}) + P_w(\text{물에 전달하는 하중})$ 인데, Fig. 2.29(b)에서는 $P_s = 0$, $P_w = P$ 이라는 것을 알 수 있다. 이제 밸브가 개방된다면 물은 밖으로 분출될 것이다(Fig. 2.29(c)). 물의 유출은 과잉공극수압의 감소와 스프링 압력증가를 수반한다. 즉, $P_s > 0$, $P_w < P$ 가된다. 밸브가 개방된 상태에서 시간이 경과하면(Fig. 2.31(d)) 과잉공극수압은 0으로 될 것이고 이 시스템은 평형상태로 될 것이다. 즉 $P_s = P$, $P_w = 0$ 이된다. 상기 내용을 침하와 관련하여 그림으로 표현하면 Fig. 2.30과 같다. Fig. 2.30(b)처럼 하중을 주게 되면 물이 빠져나가지 못하므로 Fig. 2.30(a)과 같이 침하가 발생하지 않지만 Fig. 2.30(c)와 같이 밸브가 열리면 물이 빠져나가게 되어 Fig. 2.30(c)와 같이 1차 침하압밀 침하가 발생하게 되고 Fig. 2.30(c)와 같이 배수가 완료되게 되면 2차 압밀침하가 발생하게 된다. 이 압밀 침하이론을 바탕으로 FLAC^{2D}로 수치해석을 수행하였다.

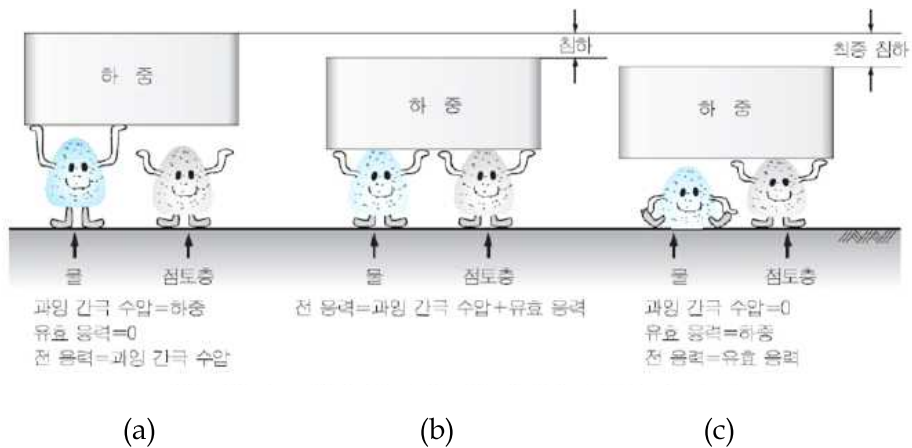


Fig. 2.30 Water and spring taking divided load (modified from Braja, 1998)

(2) 삼축압축시험

삼축압축시험에서는 봉압(confining pressure)이 축방향과 수직인 방향으로 동일하게 작용하므로 $\sigma_2 = \sigma_3$ 이다. 축응력을 가하여 시료가 파괴될 때까지 증가시킨다. 이때 $\sigma_1 - \sigma_3$ 을 축차응력(deviator stress) 또는 주응력차(principal stress difference)라고 한다. 시료가 파괴될 때 최대 주응력 및 최소 주응력을 알 수 있으므로 Mohr 원을 그릴 수 있다. 봉압 σ_3 을 증가시켜가며 동일한 방법으로 시험하면 Fig. 2.31과 같은 Mohr원을 그릴 수 있고 Mohr원에 접선을 그으면 이것이 Mohr-coulumb의 포락선이 된다.

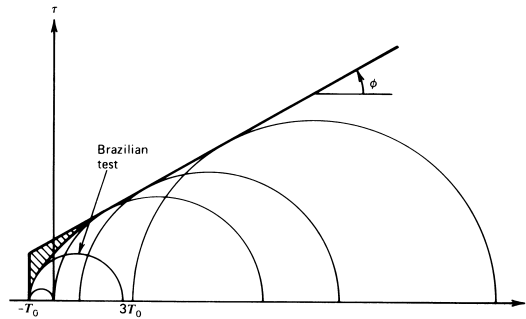


Fig. 2.31 Mohr-Coulomb fracture envelope

2.2.2 탄성물성(elastic properties)

탄성물성은 포아송비(Poisson's ratio), 탄성계수(Young's modulus)와 이의 함수로 표현되는 전단탄성계수(shear elastic modulus), 체적탄성계수(bulk elastic modulus)이고 GH 강도를 나타내는 주요 물성으로서

Masui et al.(2006)은 탄성물성으로서 일본 Nankai 지역 드릴 코어 시료로 물성 시험 한 바, GH 포화도에 따라 탄성계수를 식(2.1)으로 제안한 바 있다. 이 논문은 3.4 수치해석 사례(2)에서 상세히 언급하기로 하고 탄성 물성에 대하여 아래와 같이 간략하게 기술한다.

$$E=125+1000 \cdot S_h \quad (2.1)$$

여기서, E는 탄성계수(MPa), S_h 는 GH 포화도(%)이다.

(1) 탄성계수(Young's modulus)

Priest et al.(2011)은 GH 공진주 실험 장치를 개발하여 GH 해리시 비틀림 진동을 통해 전단탄성계수(G_{max}), 굽힘 진동을 통해 탄성계수(E_{flex})를 Fig. 2.32과 같이 구할 수 있었는데, GH 포화도에 따라 탄성계수의 변화에 차이가 있었지만 GH가 해리됨에 따라 탄성계수 및 전단탄성계수가 급격하게 떨어지는 것을 볼 수 있다. Priest et al.(2011) 논문은 3.2 실내실험 사례(1)에서 상세히 설명하기로 한다.

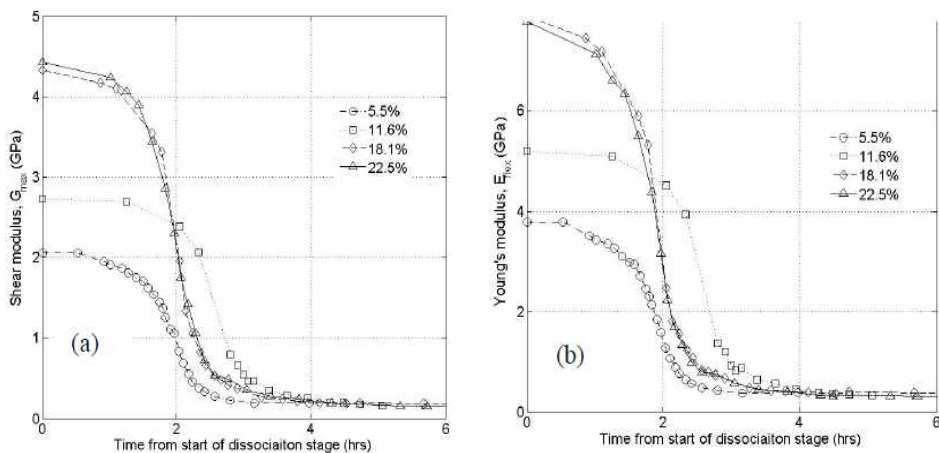


Fig. 2.32. Change in (a) G_{max} , (b) E_{flex} with time during dissociation of gas hydrate (GH saturation(%), Priest et al.(2011))

2.2.3 Mohr-Coulomb 물성

마찰각(friction angle), 점착력(cohesion), 팽창각(dilation angle)이 Mohr-Coulomb 물성으로 Masui et al.(2006)은 Mohr-Coulomb 물성에 관하여 일본 Nankai 지역 현장 시료로 물성 시험 한 바, GH 포화도에 따라 점착력과 팽창각을 식(2.2), (2.3)으로 제안한 바 있다. 따라서 Mohr-Coulomb 파괴기준 및 물성을 아래와 같이 간략하게 기술 한다.

$$c' = S_h \cdot 2.5MPa \quad (2.2)$$

$$\sin\psi = 0.05 + S_h \quad (2.3)$$

여기서, S_h 는 GH의 포화도(%)이다.

(1) Mohr-Coulomb 파괴 기준

Mohr(1900)는 재료가 최대 수직응력 또는 최대 전단응력에 의해서 파괴되는 것이 아니라 수직응력과 전단응력의 임계 결합으로 파괴된다는 이론을 제안했다. 따라서 파괴면에서의 수직응력과 전단응력 사이의 관계는 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$\tau_f = f(\sigma) \quad (2.4)$$

방정식(2.5)로 정의된 파괴 포락선은 곡선이다. 그러나 대부분의 토질 및 암석 역학 문제에 있어서는 파괴면에서의 전단응력을 수직응력의 선형함수 관계로 근사적으로 나타낼 수 있다, 이 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau = c + \sigma \tan\phi \quad (2.5)$$

여기에서, c = 점착력 ϕ = 내부마찰각. 이상과 같은 방정식을 Mohr-Coulomb의 파괴 기준이라 한다. 포화토의 임의 점에서 전 수직응력은 유효응력과 공극수압의 합이다. (식(2.6))

$$\sigma = \sigma' + u \quad (2.6)$$

유효응력 σ' 은 흙 입자에 의해서 전달되기 때문에 식(2.6)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_f = c' + (\sigma - u)\tan\phi' = c' + \sigma'\tan\phi' \quad (2.7)$$

여기에서, c' = 유효점착력, ϕ' = 유효 내부마찰각

Table 2.3 General drained friction angle of sand and silt (Braja, 1998)

soil type		ϕ'
sand :round grain	loose	27~30
	midium	30~35
	dense	35~38
sand :angular grain	loose	30~35
	midium	35~40
	dense	40~45
실트	-	26~35

일반적으로 c' 값은 모래와 무기질 실트에서는 0이며, 정규압밀점토에서는 0에 가깝고 과압밀점토에서는 0보다 더 크다. 일부 조립토에 대한 일반적인 값은 Table 2.3과 같다.

(2) 점착력(cohesion)

흙이 다른 물체에 부착되는 힘으로서, 점토 등 미세한 입자를 포함하는 흙이 어느 면에서 미끄러지려고 할 때 이면에 작용하는 전단 저항력 중 수직 압력에 관계없이 나타내는 저항력이며 내부마찰각이 0인 경우의 전단 저항력이다.(식(2.5))

Fig. 2.33에서와 같이 모래 입자 사이 GH 형성으로 모래입자가 일정한 점착력을 유지하고 있다가 GH 해리에 의해 점착력이 0이 되는 것을 알 수 있으며(Priest et al, 2011), 상기한 바와 같이 Masui et al.(2006)은 GH 포화도에 따른 점착력 변화에 관한 실험식(2.2: $c' = S_h \cdot 2.5MPa$)을 고안하였는데 이 식은 GH 포화도가 0이 되면 즉, GH가 해리되면 점착력이 0이된다는 것을 의미한다.

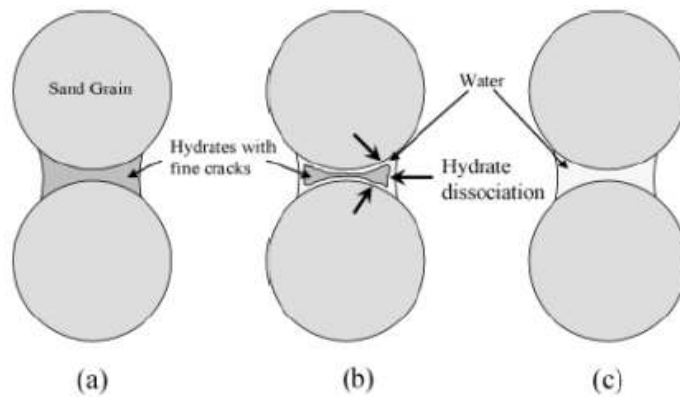


Fig. 2.33 Idealized dissociation process: (a) sand grains with hydrate cement at contacts, (b) start of hydrate dissociation occurring all over hydrate, (c) at the end of hydrate dissociation (Priest et al, 2011)

(3) 내부 마찰각(Internal friction angle)

지반의 강도를 지배하는 상수이며 일체로 된 흙 덩어리 속의 흙과 흙 사이의 마찰각으로서 Mohr-Coulomb 파괴기준에 따라 Fig. 2.34에서 직선이 수평축과 이루는 각을 말한다. 내부마찰각은 다져진 흙일수록 크다.

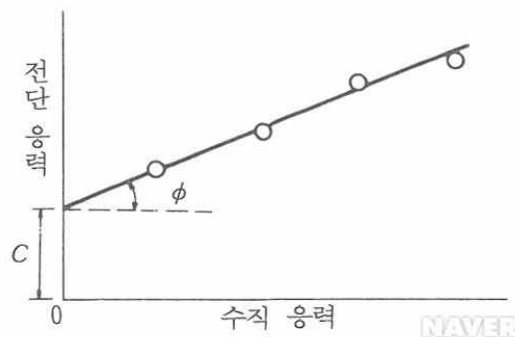


Fig. 2.34 Relation among cohesion, normal stress, shear stress and internal friction angle

상기한 바와 같이 Masui et al.(2006)은 GH 포화도에 따른 내부마찰각에 관한 실험을 하였는데 GH 형성·해리에 관계없이 내부마찰각은 35° 로 일정하다고 밝힌 바 있다. 그 이유는 GH가 해리되더라도 오버버든(overburden)에 의해 입자가 서로 접촉하게 되어 내부마찰각이 동일해지는 것으로 판단된다.

2.2.4 공극률과 투수율(porosity and permeability)

Sakamoto et al.(2008)은 실험을 통하여 GH 생산 전후의 공극률의 변화 결과를 산출하였으며 GH 포화도와 초기 공극률과 감소인자(reduction factor)를 고려한 유체투과율 변화 식을 고안하였다. 따라서 공극률과 유체투과율은 GH 생산에 있어 주요한 물성이므로 다음에 간략히 기술한다.

(1) 공극률(porosity)

공극이란 유체를 저장하거나 함유할 수 있는 암석 또는 흙내의 공간을 말한다. 공극률은 암석의 전체 부피에 대한 암석 내 공극 부피의 비로 정의하며 일반적으로 퍼센트(%)로 표시하고 절대 공극률과 유효공극률로 구분된다.

암석 또는 흙내에 존재하는 공극은 열, 가스, 지하수 흐름에 큰 영향을 미치며 강도를 저하시킨다. 퇴적암에서의 공극률은 교결물질의 종류에 크게 영향을 받으며 다른 암석에 비해 비교적 크게 나타난다.

Sakamoto et al. (2008)은 다른 입자크기를 가진 10가지 시료를 가지고 형성된 GH의 공극률과 해리된 후의 공극률을 비교하여 Table 2.4와 같이 정리하였다. 압밀현상으로 인해 최종 공극률은 초기공극률에 비해 작아지는 것을 볼 수 있다.

Table 2.4 Porosity change of sediments with different average sand grain diameters (Sakamoto et al. 2008)

Run No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Used sand	Toyoura	Toyoura	No.7	No.7	No.8	No.8	No.8& S-No.8	S-No.8	S-No.8	S-No.8
Average sand grain diameter, mm	0.200	0.200	0.180	0.180	0.115	0.115	0.0825	0.0825	0.050	0.050
Initial porosity	0.383	0.412	0.392	0.445	0.419	0.448	0.391	0.456	0.421	0.485
Final displacement, mm	5.92	7.48	7.94	13.6	11.0	16.8	10.0	16.4	14.0	16.8
Final porosity	0.345	0.367	0.339	0.361	0.347	0.339	0.324	0.351	0.324	0.382
Value of reduction N by analysis	4.80	5.50	5.00	6.80	6.83	7.50	6.65	8.80	7.00	10.0

** S-No 8: Special No.8 silica sand

(2) 유체 투과율(permeability)

유체 투과율이란 암석의 공극을 통해 유체가 이동할 수 있는 용이도로서 공극의 형태 및 배열상태 공극 내에 있는 유체의 종류와 함량에 따라 유동성이 달라지므로 다음과 같이 구분해 정의한다. ① 절대 유체투과율(k): 단상유체가 다공질 매체의 유효 공극을 100% 포화시켰을 때 유체가 흐를 수 있는 능력. ② 유효 유체투과율(k_e): 다상유체 거동 시 각각의 유체가 저류층 내에서 동시에 흐를 수 있는 능력을 말한다. 이 때 각 유체 투과율은 유체의 포화도와 밀접한 관계가 있으며 포화도가 클수록 유체 투과율이 커지는 양상은 저류층의 고유한 물성 가운데 하나이다 ③ 상대 유체투과율(k_r): 유효 유체 투과율과 절대 유체 투과율간의 비로서 다상유체 유동 시 다공질 매체에 대한 각 유체의 상대적인 유동 용이도를 나타내는 것으로 유체 포화도 및 암석의 유착 특성과 깊은 관련이 있다.

Sakamoto et al.(2008)은 형성된 GH 투과율(K_0)과 해리시 공극률 변

화율($\frac{\phi}{\phi_0}$)과 GH 포화도(S_h)를 가지고 감소인자(reduction factor: N_ϕ)를 고려하여 압밀현상으로 인한 해리 후 상대 투수율을 구할 수 있는 변화식(2.8)을 고안하였다.

$$K = K_0 \cdot \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^{N_\phi} \cdot (1 - S_h)^N \quad (2.8)$$

실험시료 HAMA#7 시료의 투수율(44.18×10^{-6} m/s)을 상기 식(2.8)에 대입하면 압밀에 의한 최종 투수율은 15.27×10^{-7} m/s로 GH가 해리되면 압밀에 의하여 투수율이 약 30%정도 감소한다. Sakamoto et al.(2008)의 논문은 3.4 수치해석 사례 (1)에서 상세히 설명하기로 한다.

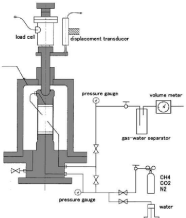
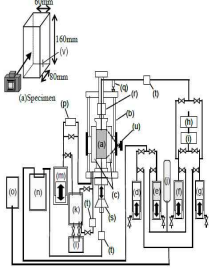
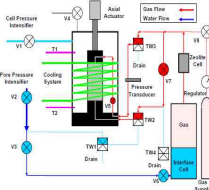

3 가스하이드레이트 실내실험 및 수치해석 사례

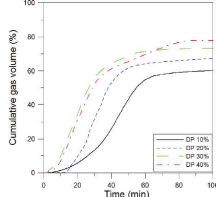
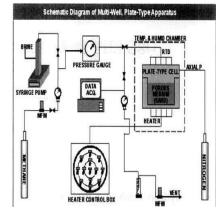
3.1 실내실험 목적 및 분류

가스하이드레이트 실내 실험은 크게 ① 물성실험 ② 안정성실험 ③ 생산 시험으로 분류되는데, 이들 3가지 종류의 실험에 대한 참고문헌들을 Table 3.1와 같이 간략하게 살펴본다.

Table 3.1 Literature of laboratory experiments on GH

분류	주 제	내 용	참고문헌
① 물성 시험	GH 형성 및 해리가 강성에 미치는 영향	GH 샘플을 형성 및 해리시키는 실험으로 포화도에 따른 시료의 강성을 측정함으로써 현장에서 가스 생산으로 인한 해리기 그 퇴적물의 강성을 감소시킨다고 함	Priest et al. (2011) (3.2에서 상세설명)
	인공 GH의 삼축압축 물성	GH 강도와 강성은 GH 포화도에 따라 증가하고 강도는 모래 입자크기와 무관하지만 강성은 입자크기와 관련이 있다고 함	Miyazaki et al. (2011) (3.2에서 상세설명)
	감압법을 이용한 메탄 하이드레이트 해리와 가스 생산 거동연구	디스크 형태의 GH 시료를 만들어 실험하여 gas와 물의 실제 유동 조건을 재현하여, GH 생산 시, 유효응력은 증가하고 공극률은 감소하며 물과 가스생산률은 2분후 급격히 저하된다고 함	Sakamoto et al.(2009) (3.2에서 상세설명)

① 물 성 실 험	일본 해양에서 채취된 GH의 삼축시험	일본 Nankai에서 채취한 가스하이드레이트로 삼축시험을 실시하고 GH 포화도에 따른 탄성계수, 마찰계수, 점착력 및 팽창각 관계식을 도출하였다.	Masui et al. (2006)
	일본 동 Nankai에서 회수된 GH시료의 물성	2004년 동 Nankai에서 채취한 GH 코어시료로 삼축시험을 실시한 바, GH 포화도가 증가함에 따라 전단 및 탄성계수는 상승하는 반면 포아송비는 특정한 경향을 띠지 않는다고 함	Masui et al.(2008) 
	Plane strain 전단 시험에 의한 메탄 하이드레이트 부분 변형	가스회수 생산으로 인한 GH 변형을 관찰하기 위해 저온 고압의 Plane strain 시험장치를 개발하고 이 시험을 실시하여 감압법에 의한 압축 변형은 내부 전단 변형을 증가에 따라 증가하고, GH 포화도에 따라 내부 강성, 강도, 체적변형률 및 전단밴드가 증가하였다고 함.	Yondeda. et al. (2011) 
	메탄 하이드레이트 시료의 비배수 삼축압축시험	물이 포화된 GH로 비배수 삼축시험을 실시하여 GH 시료의 전단강도 및 부피변화를 관찰하여 그 결과 하이드레이트 포화도에 따라 강도 및 강성이 증가하고 특히 마찰각 보다는 점착력에 대한 영향이 크다고 하였다.	Ghiassian et al.(2011) 
	② 안 정 성 실 험	GH 해리로 인해 형성된 공극이 강도에 미치는 영향을 분석한 결과, 공시체 내에 포함된 직방형 캡슐이 들어간 공시체의 일축압축강도가 10~20% 감소	박성식 등.(2009) 

	현장시료에 대한 감압법 적용연구	액체질소에 보관한 울릉분지 GH함유 현장시료를 이용하여 생산기법 적용 연구를 위해 실험시스템을 제작하여 감압법 적용 침하실험을 실시하여 실험 트질, 사질, 점토질의 수직변형률이 각각 2%, 3%, 3.9% 발생하는 것을 확인하였다.	지식경제부 (2011) (3.2에서 상세설명)
③ 생 산 성 실 험	미고결 메탄 하이드레이트 감압법적용 해리의 실험적 관찰	감압법으로 GH의 가스 생산 거동을 10m 크기의 시험장치를 통해 분석한 결과, 오른쪽 그래프와 같이 최종 누적 생산량은 평형압력 대비 40%가 가장 많았지만 30%와 거의 차이가 없었음.	Ahn et al.(2012) 
	다중공 평판형 장비를 이용한 감압법과 열자극법에 의한 가스하이드레이트 생산성 분석	다중공 평판형 시스템에서 감압법으로 실험한 바, 최고의 회수압력은 평형압력보다 200psi로 감압한 경우(단, 불안정적인 생산거동)이고 생산적정 감압은 140psi로서 회수율 70%이상으로 안정적 생산거동을 보였다고 함.	이영수 등(2009) 

GH의 주된 연구 분야는 물성, 안정성, 생산성 실험이며 본 논문주제와 가장 유사한 연구 자료는 “현장시료에 대한 감압법 적용 연구”로서 울릉분지 GH함유 현장시료에 감압법 적용 침하실험을 실시한 사례이다. 4.1.2 수치해석 방법 및 적용타당성 검토에서 이 실험 결과를 FLAC^{2D} 해석 결과 및 이론해의 산출결과와 비교하여 시험생산 후보지에 FLAC^{2D} 수치해석을 적용하는 것이 타당한 것인지를 검토하는 데 활용하였다.

3.2 실내실험 사례

(1) Priest 등의 연구

Priest et al.(2011)은 인공 GH 샘플을 생성하여 해리시키는 실험을 하여 생성/해리시 GH 포화도에 따른 시료의 강성뿐만 아니라 최종 강성을 측정함으로써 현장에서 가스를 생산하는 동안 발생하는 GH 해리가 그 퇴적물(sediment)의 강성을 감소시킨다고 주장하였다.

Fig. 3.1은 GH 생성 시간과 GH 포화도에 따른 탄성계수와 전단변형계수의 변화를 나타내는 그래프로써 생성 시간과 포화도에 따라 G_{max} 와 E_{flex} 가 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 2.33은 GH 해리 시간과 GH 포화도에 따른 탄성계수와 강성계수의 변화를 보여주는 그래프로써, 해리되는 시간에 따라 G_{max} 와 E_{flex} 가 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 GH 생성과 정 반대이다. 다만, 생성 보다 해리가 훨씬 빨리 진행되는데 해리 시에는 약 4시간 만에 원래의 물성으로 되돌아가지만 생성 시에는 약 24 시간이 지나야 물성이 변화가 시작되는 것을 볼 수 있다. 이는 GH 생성 시 보다 해리 시에 민감하게 강성이 변화하는 것을 알 수 있다.

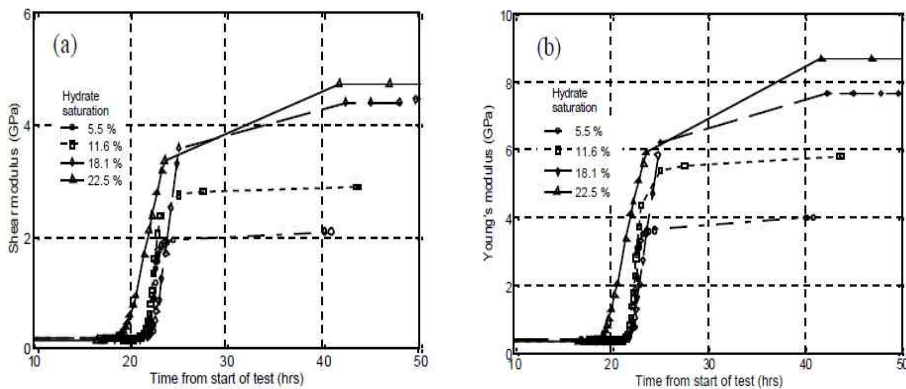


Fig. 3.1 (a) Change in shear modulus and (b) Young's modulus during hydrate formation over time

Fig. 3.2은 GH가 이상적으로 생성되는 과정을 설명하는 그림으로서 입자사이 접촉부 사이에 물의 두께가 조금씩 증가하여 GH가 완전히 생성되는 과정을 보여준다.

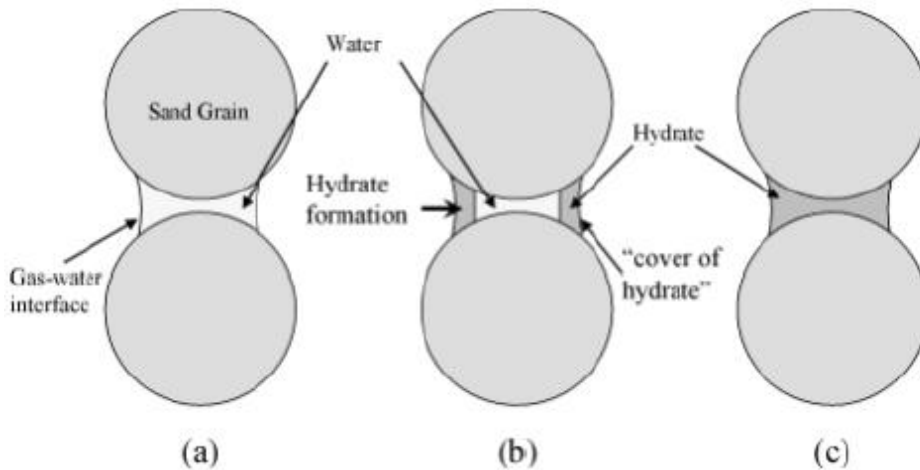


Fig. 3.2 Idealized growth of hydrate during formation; (a) sand grains with water at grain contacts, (b) start of hydrate formation at water-gas interface with formation of "hydrate cover", (c) end of hydrate formation

대조적으로, 해리과정은 Fig. 2.33에서 보는 바와 같이 GH와 입자의 접촉부에서부터 시작하여 GH가 줄어들면서 진행된다. 이에 따라 해리된 GH는 공극사이에서 자유롭게 이동 가능하게 되어 시료의 강성을 크게 감소시킨다. GH가 15%만 해리되어도 강성 값은 GH가 없는 조건의 강성 값에 근접하게 된다.

(2) Miyazaki 등의 연구

Miyazaki et al.(2011)은 GH 안정조건에서 인공 GH 삼축 압축시험을 실시한 결과 GH 강도와 강성(strength and stiffness)은 GH 포화도가

증가함에 따라 GH와 모래입자와의 고결작용(cementation)으로 인해 증가하고, 강도는 모래타입과 무관하지만 강성은 모래입자크기가 미세할수록 낮다고 입증하였다.

Fig. 3.3와 같이 GH 포화도가 클수록 강도(최대 축차응력)가 증가하는 것을 볼 수 있다.

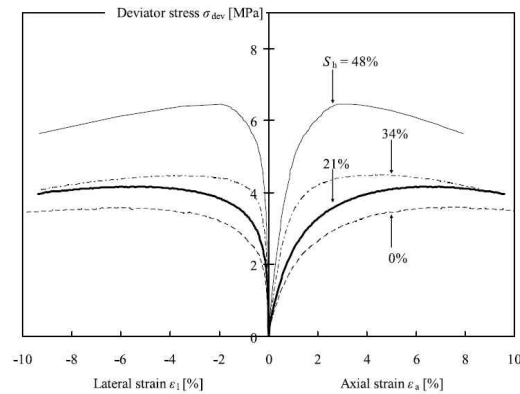


Fig. 3.3 Deviator stress σ_{dev} versus axial strain ϵ_a and lateral strain ϵ_l for Toyoura and hydrate-Toyourea sand specimens under 1 MPa effective confining pressure.

그림 3.4와 같이, 입자가 큰 Toyoura sand(평균입자크기: $230\mu m$)와 입자가 작은 Silica sand#8의 축차응력 vs. 축변형률 및 축차응력 vs. 횡변형률의 초기 경사도를 비교해 볼 때 Toyoura sand가 가장 큰 강성(stiffness)을 가지며 Silica sand#8이 가장 작은 강성을 갖는 것을 볼 수 있다. 따라서 강성은 입자 크기 따라 달라진다는 것을 알 수 있다.

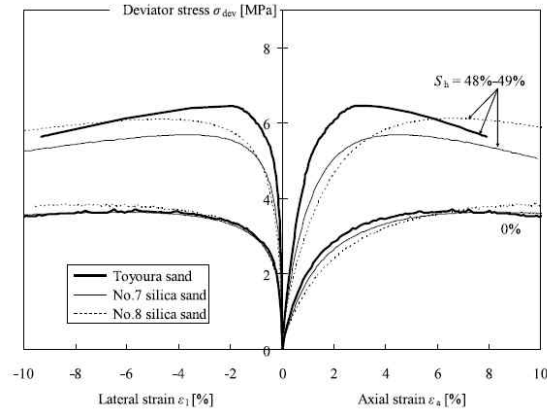


Fig. 3.4 Deviator stress σ_{dev} versus axial strain ϵ_a and lateral strain ϵ_l for sand and hydrate-sand specimens containing Toyoura sand, number 7 silica sand, and number 8 silica sand under 1 MPa effective confining pressure

(3) Sakamoto 등의 연구

Sakamoto et al.(2009) 은 디스크 형태의 GH 시료를 만들어 실험하여 가스와 물의 실제 유동 조건을 재현하였다.

투수율이 낮은 머드층은 수직 유동 흐름을 방해하므로 수직 압밀과 관련하여 수평 투수율 특성을 고려하는 것이 매우 중요하다.

Table 3.2는 각 시료에 대한 실험 조건을 보여준다. 감압법 실시 시 실험조건 변화에 따른 영향을 명확히 구분하기 위하여 Run No.1을 표준 조건으로 하여 Run No. 4는 유효응력이 1 MPa로 세팅된 GH 해리에 국한된 압밀거동으로 언급한다.

Table 3.2 Experimental conditions for consolidation-permeability tests

Run No.	1	2	3	4
Sand used	Toyoura	Toyoura	Toyoura	Toyoura
Initial porosity	0.385	0.373	0.387	0.381
GH saturation	0.393	0.00	0.397	0.405
Outlet pressure, MPa	3.10	3.05	3.15	3.24
Effective stress during dissociation, MPa	7.96	8.01	7.88	0.99
Final porosity after consolidation	0.376	0.364	0.377	0.382

Fig. 3.5은 감압법시 압밀거동에 대한 유효응력의 관련성을 보여준다. 감압법에 의하여 유효응력이 8 MPa에 도달할 때 까지 Run No.1에서 현격하게 압밀이 발생한 다음 서서히 압밀이 진행된다. 압축변형률도 2 분경과 시까지 0.97×10^{-2} 까지 급격히 증가하다가 서서히 1.47×10^{-2} 까지 점진적으로 증가되는데 이는 초기 단계(2분)에서 압밀의 양이 최종 값의 약 65.7%에 해당한다는 것을 의미한다. 반면 Run No.4의 압축 변형률은 감압법이 진행되더라도 0을 유지하는 것을 볼 수 있다. 따라서 유효응력의 증가가 압밀거동의 지배적인 요소이며 압밀은 감압법의 초기 단계에서 대부분 진행된다는 것을 알 수 있다. 또한 공극률은 Run No.1의 유효응력 증가로 인한 압밀에 의하여 0.385에서 0.376로 감소하는 것을 볼 수 있다.

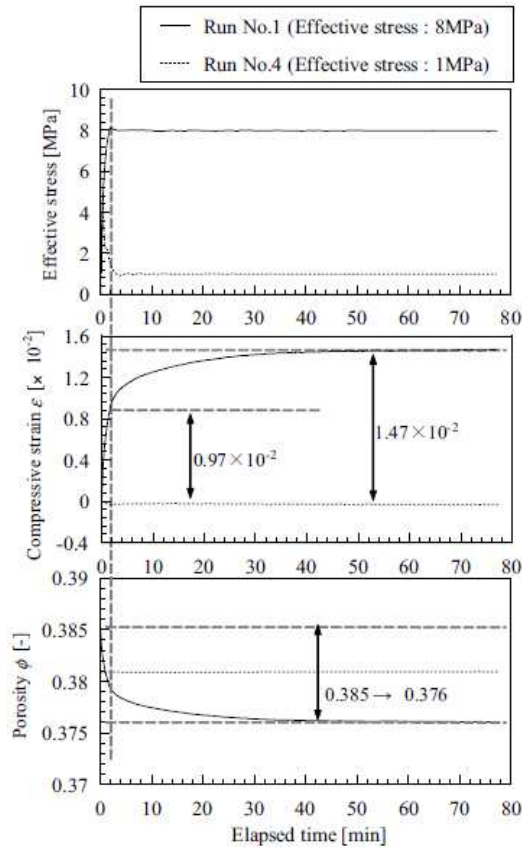


Fig. 3.5 Consolidation behavior during GH dissociation with different effective stresses

(4) 현장시료에 대한 감압법 적용연구 (지식경제부, 2011)

생산기법 현장적용을 위해 동해울릉분지 현장 시료에 감압법을 적용하여 침하량을 분석하였다. 2007년 동해 울릉분지 심부시추의 압력코어로 회수하여 액체질소에 보관한 시료는 완전 동결기를 거쳤으므로 교란을 거친 시료이다.

① 실험장비

액체질소에 보관한 GH 함유시료를 이용하여 물성 측정 및 생산기법 적

용연구를 위해 실험시스템을 제작하였다. 심해 퇴적층을 모사하기 위해 20 MPa의 공극압력과 3 MPa의 유효수직응력을 두 개의 시린지(syringe) 펌프와 컴퓨터로 프로그램/조작되게 되어 있고 압력 셀의 내부 직경과 피스톤 직경은 코어 직경에 따라 변경가능하며 장착 가능 길이의 최대는 100mm이다. 압력셀에는 온도계, 유체 유동 포트 등이 상하 캡 (스테인레스 스틸)에 장착되어 있다. 온도조절방식은 냉각 항온 순화조를 통해 항온수가 압력 셀 주변으로 순환하는 방식이다.

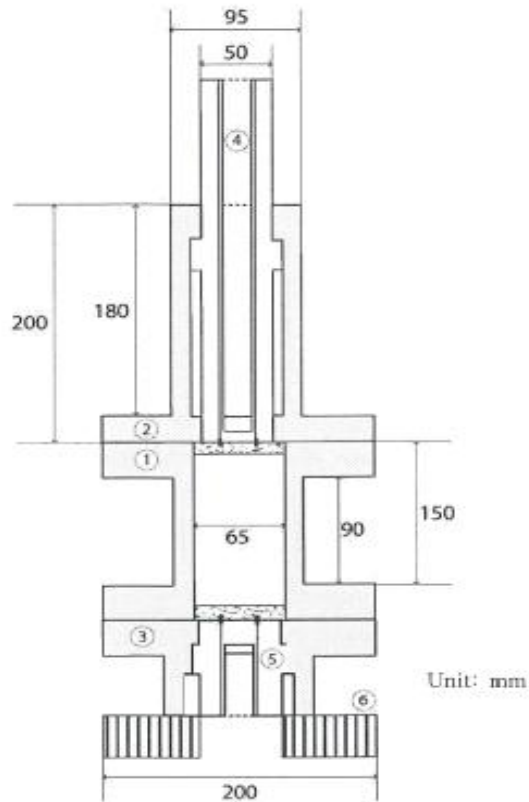


Fig. 3.6 Schematic diagram of pressure cell for in-situ hydrate-bearing sediment specimens ① main body ② top cap with axial pressure applying system ③ bottom cap ④ piston ⑤ bottom cap ⑥ bottom plate

② 실험 방법

액체질소에 보관 되었던 GH 함유 현장시료를 이용하여 감압법을 실시하였다.

액체질소에 보관한 샘플을 실험에 적합한 크기로 하여 셀에 넣고 상부 캡 장착 후 메인 셀에 500 psi(3.45 MPa) 이상의 압력을 주입하고 극저온 시료를 1°C로 안정시키며 축압 10 psi(0.069 MPa)을 가한다. 수직 유효응력을 단계적으로(3단계 29 psi(0.2 MPa), 44 psi(0.3 MPa), 58 psi(0.4 MPa)로 재하 하여 압밀이 완성되면, 수직 유효응력이 가해진 상태에서 공극압을(3단계)로 감압하여 GH를 해리시킨다.

GH 1차 시추지역에서 회수한 압력코어 중 사질 시료와 실트질 시료, 점토질 시료를 사용하여 총 3개의 현장시료에 대한 단계적 감압 실험을 실시하였다. 시료의 크기는 직경 50 mm 높이 50 mm이며 감압은 GH 포화도에 따라 3단계에 걸쳐 단계적으로 이루어졌다.

③ 실험결과

✓ 실트질 시료

첫 번째 감압은 약 15분간 이루어졌으며 400 psi(2.76 MPa)까지 감압하였다. 2차 감압단계부터 이미 시료 내 GH가 모두 해리된 상태이므로 2차와 3차에서는 감압으로 인한 공극수 내 용존 천연가스 팽창과 가스 상태로 변한 천연가스 회수로 인한 압력변화만 포착되었다.

첫 번째 감압 시 공극 내 GH 해리로 인해 1% 정도 침하되었고, 두 번째 감압에서는 잔류 GH 함량이 적어 상대적으로 낮은 침하량(0.3%)을 보였으며, 세 번째 감압 시에는 두 번째 감압보다 상대적으로 높은 침하량(0.7%)이 나타났는데 이는 상대적으로 감압량이 증가하여 교란이 심하게 일어났기 때문이다. 최종 침하량은 2%이다.

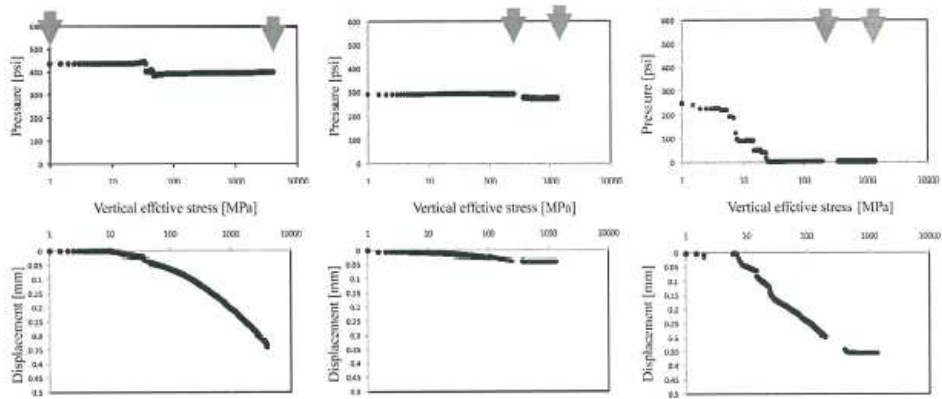


Fig. 3.7 Evolution of pore pressure and vertical displacement during step depression (Arrow indicates X-ray CT)

✓ 사질 시료

첫 번째 감압은 약 7분간 이루어졌으며 GH 안정영역 약간 아래인 400 psi(2.76 MPa)까지 감압하여 약 5%(약 2.5 mm)가 침하되었다. 이때 감압 완료 후에 GH 해리로 압력이 다시 높아지는 현상이 발생하였다. 압력이 안정되는 시점에서 감압의 영향이 시료 내에 모두 전파되고 GH가 해리되어 가스가 발생되었다. 감압실시 후 약 100분 만에 압력이 안정되었다.

두 번째 감압은 최종압력 300 psi(2.07 MPa)로 감압하여 약 0.1 mm(0.02%) 침하가 발생하였고, 이때 잔류 GH 함량이 많지 않아 해리에 의한 압력 상승이 현저하게 포착되지는 않으나 소폭 압력이 상승하는 경향을 보였고 이 상승도 약 100분 후에 안정되었다.

세 번째 감압은 GH가 모두 해리되어 있는 상태에서 잔여압력을 모두 감압하여 약 0.08 mm(0.08%) 침하되었다. 이는 GH가 남아있지 않은 상태이나 아주 느린 속도로 압력이 아주 천천히 풀려나면서 생기는 현상으로 GH 부존상태에 비해 상승폭이 매우 작다. 총 감압결과 6%의 침하

량을 보여 실트질 시료에 비해 상당히 큰 침하량을 보였다. 사질시료의 GH 함유량이 실트질 시료보다 높기 때문이다. GH가 거의 해리된 두 번째와 세 번째의 감압에서는 실트질과 유사한 침하량을 보이고 있다.

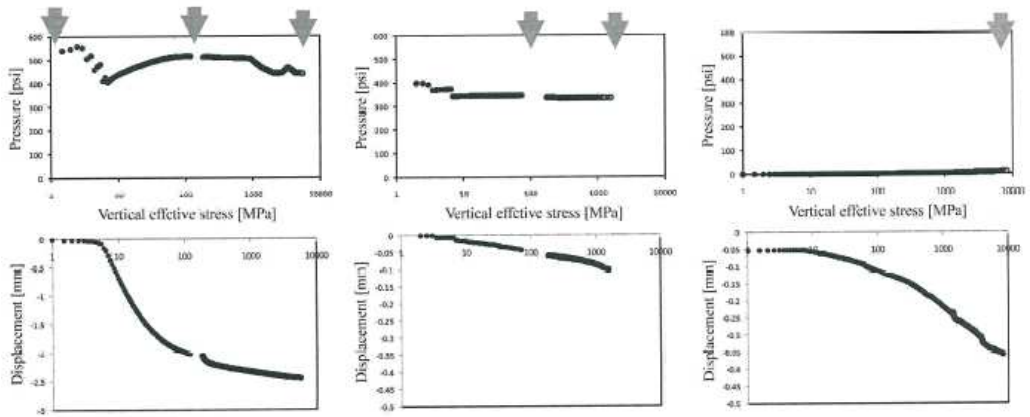


Fig. 3.8 Evolution of pore pressure and vertical displacement during step depressurization sand (Arrow indicates X ray CT)

✓ 균열 점토질 시료

첫 번째 감압은 약 5분간 이루어졌으며 GH 안정영역 약간 아래인 400 psi(2.76 MPa)까지 감압한 결과 1.6% 침하량을 보였으며 이때 감압 완료 후에 GH 해리로 압력이 다시 높아지는데 이는 압력이 안정되는 시점을 시료 내에서 감압의 영향이 시료에 모두 전파되고 GH가 해리되어 가스가 발생하는 시점이다. 두 번째 감압에서 0.5% 침하하였고 이 때 잔류 GH 함유량이 많지 않아 압력상승이 현저하게 포착되지는 않았지만 소폭 상승하는 경향을 보였다. 3번째 감압에서 수직변형률은 1.8%로, 최종수직변형률은 3.9%로서 대체로 모든 감압 단계에서 실트질 시료와 유사한 양상을 보였다.

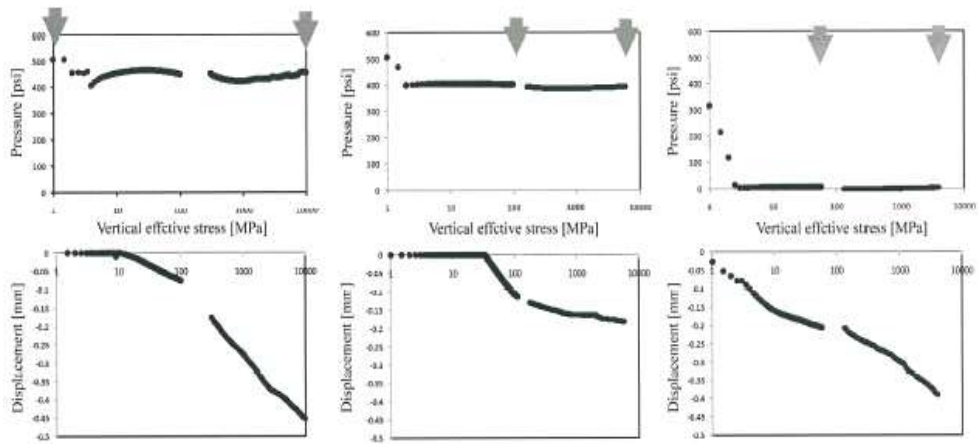


Fig. 3.9 Evolution of pore pressure and vertical displacement during step depression (Fissured clay) Arrow indicates X-ray CT

상기 실트질, 사질, 점토질에 대하여 1, 2, 3차 감압에 따른 침하률과 침하량을 Table 3.3과 같이 종합하여 정리하였다.

Table 3.3. Amount of settlement on site sediment by depressurization

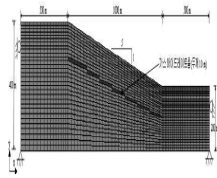
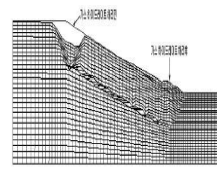
시료		1차 감압 (2.76 MPa)	2차 감압 (2.07 MPa)	3차 감압 (0 MPa)	최종침하	비고 (단위)
침하률 / 침하량	실트질	1	0.3	0.7	2	%
		0.5	0.15	0.35	1	mm
	사질	5	0.02	0.08	6	%
		2.5	0.1	0.4	3	mm
	점토질	1.6	0.5	1.8	3.9	%
		0.8	0.25	0.9	1.95	mm

3.3 수치해석 목적 및 분류

지반 거동 관련 수치해석은 여러 가지로 분류할 수 있지만 본 논문에서는 크게 ①물성 변화 예측모사 ② 해저 지반침하 ③ 해저 사면 붕괴 모사로 분류하고 이들 2가지 수치해석 모사에 대한 참고문헌들을 Table 3.4와 같이 간략하게 살펴본다.

Table 3.4 Literature of numerical analysis on GH

분류	참고문헌	요 약	비고
① 물 성 변 화 예 측	감압법으로 GH 해리시 압밀 및 가스 생산 거동 모사	감압법으로 공극수압이 감소함에 따라 유효응력이 증가하여 오버버든에 의해 GH 퇴적층에 압밀이 발생하여 투수율과 공극률이 감소되고 결과적으로 가스 생산성이 저하된다고 함 (투수율 예측식 고안)	Sakamoto et al. (2008) $K = K_0 \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right)^2 \left(\frac{D_{L1}}{D_{L0}} \right)^{1/2} \left(\frac{D_{L2}}{D_{L0}} \right)^{1/2} \cdot (1 - S_g)^N$ (3.4 (1)에서 상세설명)
② 해 저 지 반 침 하	메탄하이드레이트 층에서 메탄 생산의 THM 커플링	FLAC으로 THM 커플링코드를 이용하여 메탄가스 생산과정을 모사하여 GH 포화도 24%의 시료를 40% 감압시 6.3%의 수직변형이 발생한다고 함.	Ng, M.Y.A. et al. (2008) (3.4 (2)에서 상세설명)
	메탄하이드레이트 해리로 인한 해저지반 변형의 TCM 커플링 수치해석모사	TCM 커플링을 기반으로 한 모사방법을 개발하여 감압법을 이용하여 천연가스를 생산하는 과정을 수치해석으로 모사하여 GH 포화도 64.3% 시료를 64%감압시 9.4% 수직변형이 발생한다고 함.	Kimoto et al. (2007) (3.4 (3)에서 상세설명)

③ 해저사면 붕괴	GH 해리로 인한 해저사면의 붕괴에 관한 연구	GH가 매장된 해저사면에서 GH 해리에 따른 해저사면의 안정성을 모사하였는데, 온도나 압력의 변화로 해리가 시작되면 해저사면 내 과잉공극수압이 발생하여 유효응력 감소와 그에 따른 강성 및 강도저하가 발생하여 사면붕괴가 발생한다는 원리로 오른쪽 그림과 같이 해저사면 100m아래 두께 10m의 1% 포화도의 GH 층을 가정했을 때 사면정상부에서 약 100m이상의 변위가 발생하였다.	박성식(2008)
			해리 전
			
			해리 후
			

상기와 같이 주된 연구 분야는 물성변화예측, 해저지반침하, 해저사면 붕괴 수치해석모사로 본 논문주제와 유사한 연구문헌②를 발견하였지만, 이는 실내실험 크기의 미시적 관점의 수치해석으로서 본 논문 수치해석 대상인 울릉분지 GH 시추지역 중 1곳(UBGH-X) 현장크기의 거시관점의 수치해석과는 성질이 다르다. Table 3.4의 처음부터 3번째까지의 문헌은 본 논문 수치해석 모사에 활용할 수 있을 뿐만 아니라 주요 비교대상이 되므로 이하, 상세히 살펴보기로 한다.

3.4 수치해석 사례

(1) Sakamoto 등의 연구

Sakamoto et al.(2008)은 GH 포화도와 초기 공극률, 감소인자(reduction factor)를 고려한 투수율 변화식을 다음과 같은 과정을 통해 고안하였다.

Fig. 3.10은 공극에 GH 포화도가 증가할수록 절대투수율은 낮아지는 것을 보여준다. 실험결과를 근거로 GH 포화도와 절대투수율의 관계를 다음과 같은 식(3.1)으로 나타내며 이 수식에서 N은 감소 인자(reduction factor) 이고 K_0 는 GH 포화도가 없을 때의 절대투수율을 말한다.

$$K = K_0 \cdot (1 - S_{h1})^N$$

$$N = 10.384 \cdot S_{h1}^2 - 27.773 \cdot S_{h1} + 13.639 \quad (3.1)$$

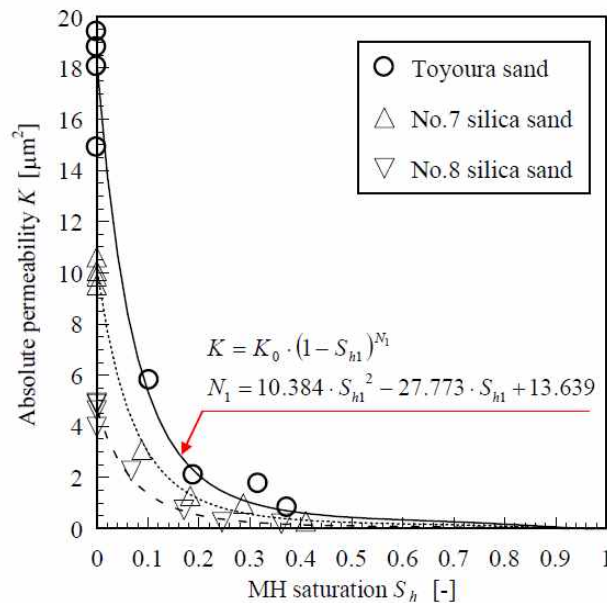


Fig. 3.10 Absolute permeability as a function of GH saturation

절대 투수율과 공극률의 관계가 실험에서 측정되어 이 관계를 초기 공극률비의 함수로 다음 식(3.2)과 같이 표현한다.

$$K_0' = K_0 \cdot \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right)^{N_\phi} \quad (3.2)$$

공극률 비에 대한 감소인자(N_ψ)는 수치해석을 통해 얻어진다. 결국 식(3.2)은 다음 식(3.3)과 같이 된다.

$$K = K_0 \cdot \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right)^{N_\phi} \cdot (1 - S_h)^N \quad (3.3)$$

각 실험에 대한 감소인자(N_ψ : 감압법 적용 시 압밀에 의해 GH 해리 후 투수율을 감소시키는 인자) 값은 수치해석을 통하여 Table 2.4에 보는 바와 같이 4.8에서 10.0의 범위에 있다.

Fig. 3.11은 관련하여 초기공극률(ψ_0)함수에 따른 감소인자(N_ψ)변화를 보여주는 그래프로서 초기공극률 및 감소인자 증가율이 비례하는 것을 보여 준다.

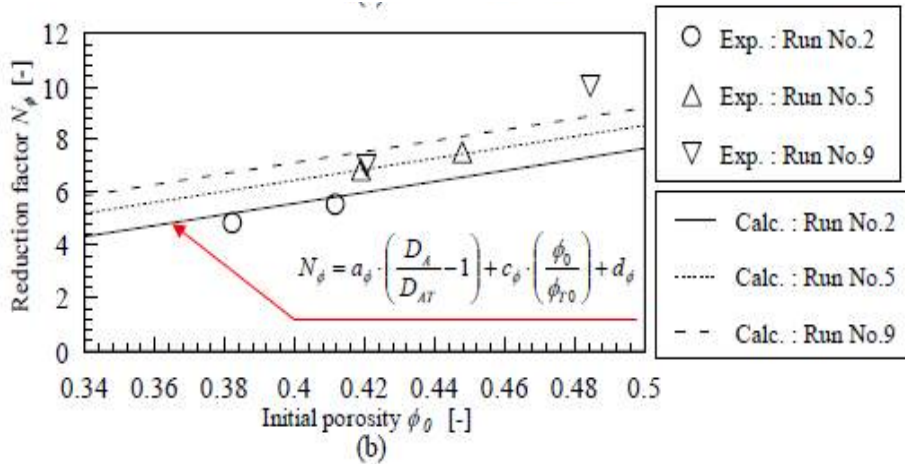


Fig. 3.11 Formulation of reduction factor for porosity ratio in absolute permeability equation.

Fig. 3.12는 시간에 따른 생산정 주변의 침하량에 대한 그래프로서 감소인자(N_ψ)가 15인 경우 침하량이 가장 적게 발생하는 것을 볼 수 있다. 압밀에 의한 투수율 감소로 GH저류층으로 압력이 전달되는 것을 방해하여 GH 해리를 지연시켜서 유효응력이 높게 유지되어 공극에 많은 양의 GH가 남아있게 된다. 결론적으로 압밀에 의한 절대 투수율 변화는 지반 변형 및 가스 생산에 있어 매우 중요한 파라미터라 할 수 있다.

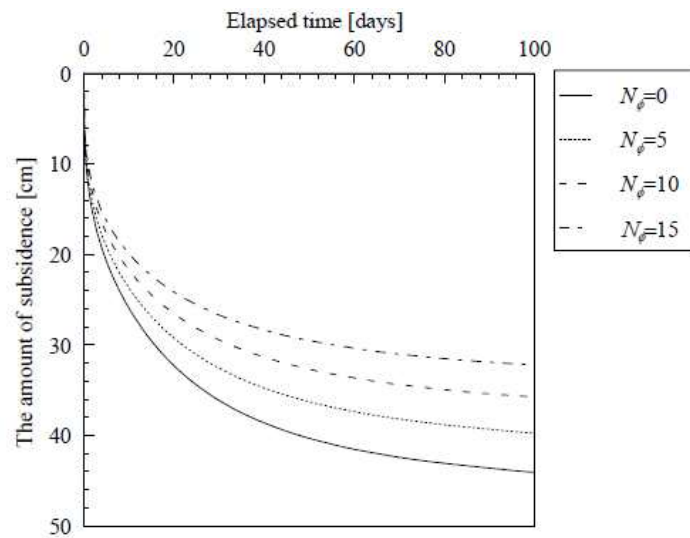


Fig. 3.12 Amount of subsidence at neighborhood of production well with time according to different N_ψ

(2) Ng, M.Y.A. 등의 연구

Ng, M.Y.A. et al.(2008)은 FLAC으로 변형-유동-열 커플링(coupled deformation-flow-thermal) 코드를 이용하여 메탄가스 생산과정(extraction process)을 모사하였다.

일본 Nankai site에서 채취한 GH로 3축 시험을 실시한 자료(Masui et al., 2006)를 근거로 GH의 물성은 GH 포화도와 밀접한 관계가 있다는 것을 발견하였다(Soga et al., 2006). Fig. 3.13에서 보는 바와 같이, 동

일 온도, 봉압 조건에서 GH 포화도가 높을수록 초기 탄성계수와 팽창효과(dilation effect)가 커지고 마찰각은 35° 로 일정하게 유지되고 점착력과 팽창각은 GH 포화도에 따라 증가한다(Fig. 3.13a). 탄성-소성 모델의 파라미터에 대한 방정식은 다음 식(3.4), (3.5)와 같다.

Elastic properties

$$\text{Young's modules } E = (125 + 1000 \cdot S_h) \quad (3.4)$$

$$\text{Poisson ratio } \nu = 0.25$$

Modified Mohr-Coulomb properties

$$\text{Friction angle } \phi = 35^\circ$$

$$\text{Cohesion } c' = S_h \cdot 2.5 \text{ MPa} \quad (3.5)$$

$$\text{Dilation angle } \sin \psi = 0.05 + 0.5 \cdot S_h$$

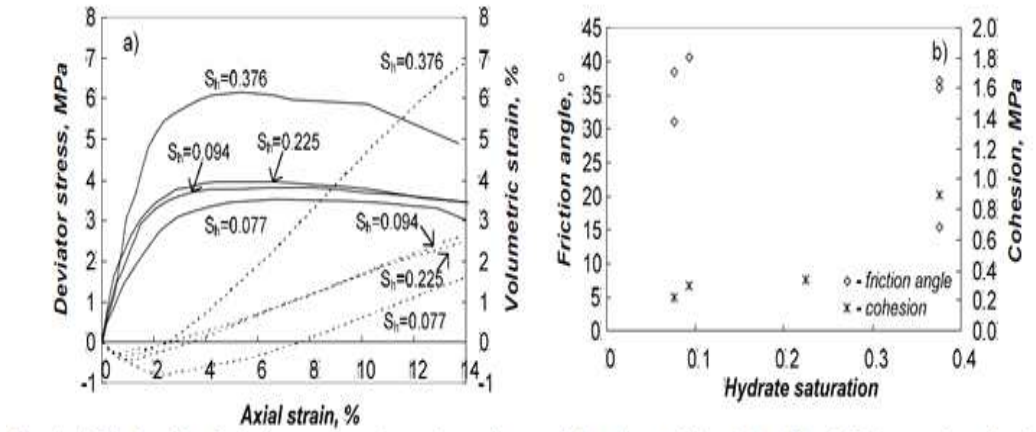


Fig. 3.13 Relationship of deviator stress - volumetric strain vs. axial strain(left) and relationship of friction angle and cohesion with hydrate saturation for hydrate-sand in the Nankai Trough(right, Masui et al., 2006)

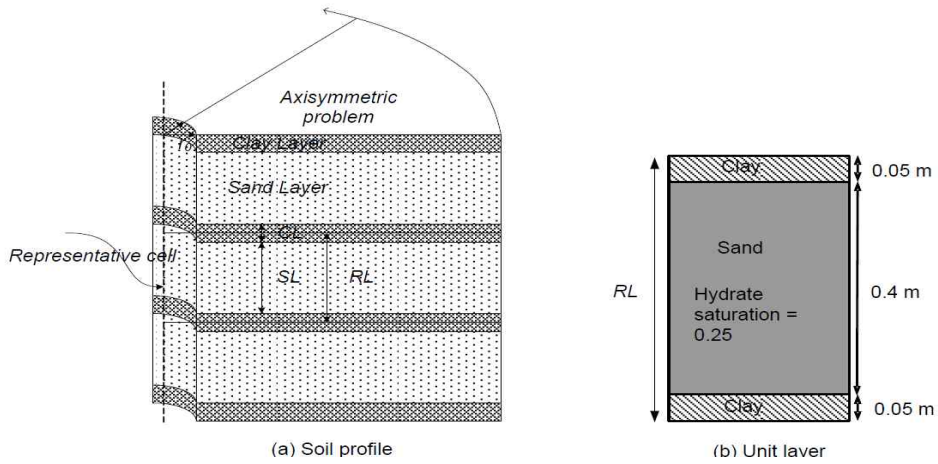


Fig. 3.14 Alternating sand and clay layers in the Nankai Trough(left) and unit layer(right)

수치해석 모델(Fig. 3.14)을 구성하고 상기 식(3.4), (3.5)을 이용하여 각 파라미터를 산출하였고 현장응력조건(in situ stress condition)은 초기 수직 유효응력 2 MPa, 공극수압 9 MPa(즉, 수직 전 응력 11 MPa)이다. 측압비(K_0)가 0.5이면 초기 수평 유효응력은 1 MPa이 되므로 수평 전응력은 10 MPa이 되며 이 수평 전응력을 10 MPa에서 4.5 MPa(공극수압의 50%)로 감압시켜 GH를 해리시키고 메탄가스가 생산으로 유동하게 하였다. 그 결과, Fig. 3.15에서 보어홀로부터 두 가지인 $r/r_0=1$ 과 $r/r_0=1.22$ 에 대하여 보어 홀의 높이에 따른 수직변위를 보여준다. $r/r_0=1$ 의 수직 변위가 $r/r_0=1.22$ 의 수직변위 보다 크게 발생하였고 열 영향을 고려한 경우가 보다 작은 수직변위가 발생하는 것을 알 수 있다. 열 영향을 고려한 경우 총0.5m의 층 두께 중에서 약 0.03m의 수직변위가 발생하였으므로 총 6%의 수직변형률이 발생하였다.

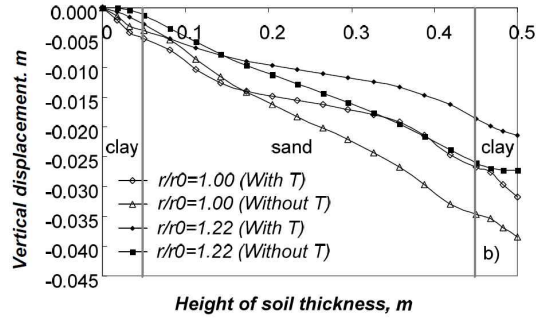


Fig. 3.15 Vertical displacement of soil in the study with/without thermal consideration

Fig. 3.16은 감압됨에 따라 생산정으로부터 거리가 이격될수록 유효 응력이 점점 감소하고 공극수압은 증가하는 것을 보여준다.

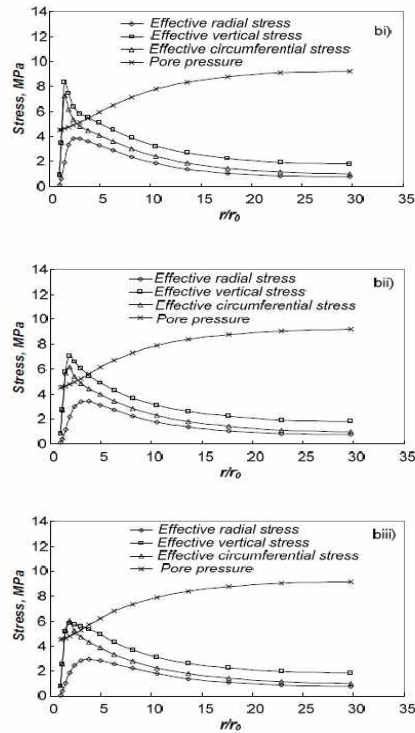


Fig. 3.16 Effective stress along radial direction bi) simulation with RL(Sand layer + Clay layer) = 0.5m bii) RL=1.0m biii) RL=2.0m

(3) Kimoto 등의 연구

Kimoto et al.(2007)은 GH 해리로 인한 지반 변형(ground deformation)예측을 위하여 화학-열-역학(chemo - thermo - mechanical) 커플링을 기반으로 한 모사방법을 개발하여 열주입법 및 감압법을 이용하여 GH를 해리시켜 천연가스를 생산하는 과정을 수치해석으로 모사하였다.

다상물질(즉, 모래입자, 물, 공기)의 거동이 다공성 매체 이론을 이용하여 거시적 역학적 연속체 접근으로 설명되어야 하는 바, 포화 흙을 위한 Biot의 다상 혼합 이론을 적용시켰고, 액상뿐만 아니라 기상(liquid phase)을 위한 질량보전 법칙을 적용하였고 또한 에너지 보전법칙 및 모멘텀 보전 법칙 등을 적용하였다.

Fig. 3.17은 경계조건과 유한 요소 메시에 대한 그림으로서 해수면으로부터 1100m, 해저면 으로부터 200m 아래에 매장되어 있는 GH층을 Fig. 3.17 오른쪽 그림과 같이 수직방향 50cm, 수평방향 10cm으로 메시를 형성하고 y축 절점에 x축 고정 x축 절점에 xy고정 등의 경계조건을 부여하였고 ③으로 감압 및 열을 적용하였다.

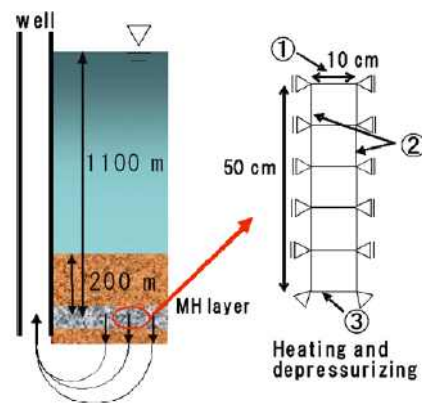


Fig. 3.17 Finite element mesh and boundary conditions

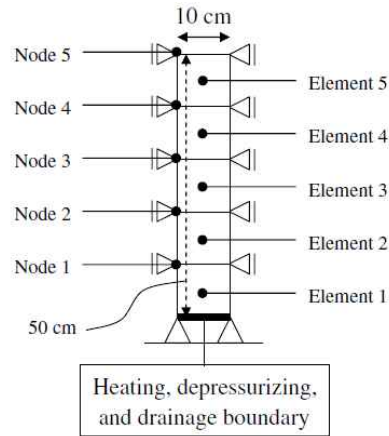


Fig. 3.18 Number of elements and nodes.

Fig. 3.18는 요소(element)와 노드(node)의 개수를 나타낸다.

Fig. 3.19(a)와 같이 초기조건으로 압력은 11 MPa, 온도는 282K로 설정하였고 열주입법에서는 282K에서 303K로, 감압법에서는 11 MPa에서 4 MPa로 감압하였다.

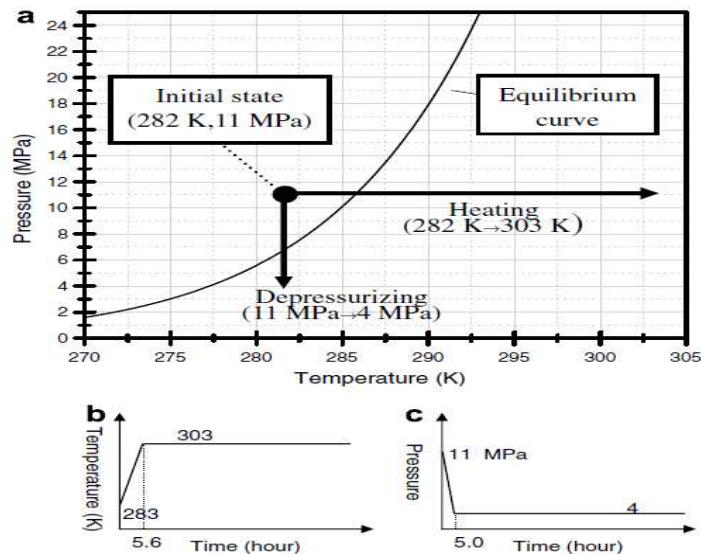


Fig. 3.19 Conditions of heating and depressurization (a) Dissociating conditions with equilibrium curve (b) heating condition (c) depressurization condition

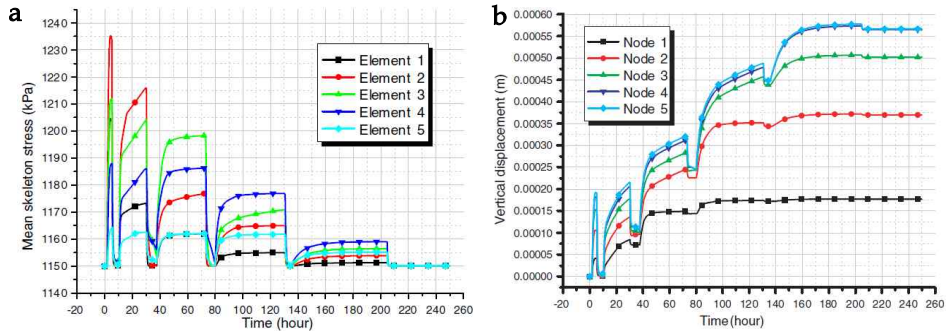


Fig. 3.20 Simulation results for the depressurization method
(a) mean skeleton stress (b) vertical displacement.

초기 공극률은 0.47, 초기 GH 포화도는 0.643로 설정하였다.

공극압력의 작아짐에 따라 Fig. 3.20(a)와 같이 skeleton stress가 증가함을 볼 수 있다. Fig. 3.20(b)와 같이 47 mm의 수직변위 즉, 평균 수직변형률이 9.4%가 발생하였다.

수치해석 모사 결과 지반변형(ground deformation)은 공극유체(물, 가스)의 생산으로 인한 유효응력의 변화와 GH의 점착력(bonding) 손실로부터 발생하는 흙 구조의 변화에 영향이 있다고 예측하였고 열주입법 보다는 감압법에 의한 침하가 더 많이 발생된다고 예측하였다.

4. 해저지반거동 수치해석

4.1 해석 조건

본 논문의 목적은 가스하이드레이트 회수 생산 시 해저지반거동 예측으로써 이를 위해 토질 및 지반거동 해석 시뮬레이터인 FLAC^{2D}를 선택하였으므로 아래와 같이 기본이론을 살펴본다.

4.1.1 FLAC^{2D}의 기본이론

(1) 개요

FLAC은 Fast Lagrangian Analysis of Continua의 약자로서 공학적 역학 계산을 위한 2차원 유한차분법(finite Difference Method)을 이용한 범용프로그램이다. 평형(equilibrium), 구성(constitution), 연속(continuity), 운동방정식(equations of motion) 등의 지배 방정식이 구성되며 2차원 연속체 공간(two dimensional Continuum space)을 유한 차분망으로 원하는 만큼 자세하게 분할하여 임의의 위치에서 각각의 지배 방정식의 해를 구하는 프로그램이다. 물체를 여러 개의 요소로 분리하고 각 요소를 절점으로 연결하여 절점에 대한 운동방정식과 구성방정식을 생성하는 방법으로 해석한다. Fig. 4.1과 같이, 요소와 절점에 대하여 시간을 세분화하여 이전 단계에서 계산한 응력 또는 힘으로부터 새로운 운동방정식(평형방정식)을 계산하고 그로부터 새로운 속도 및 변위를 계산한다. 또 새로 계산한 속도 및 변위로부터 구성방정식(응력/변형관계)을 구하는 과정을 반복 계산하여 최종 해를 구한다.

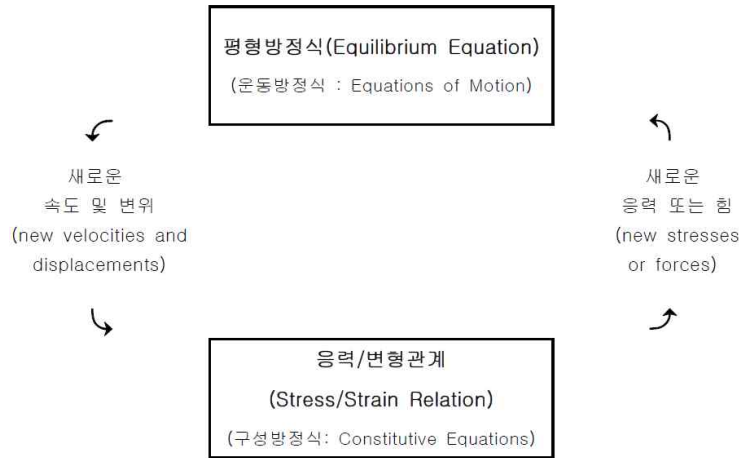


Fig. 4.1 Basic explicit calculation cycle

FLAC^{2D}가 바탕을 두고 있는 수치해석 방법은 유한 차분법으로서 가장 큰 특징은 임의의 절점에서 발생한 변위는 오직 인접한 절점에만 영향을 미친다는 것이다. 그러므로 유한요소법처럼 매트릭스를 구하여 해석할 필요가 없으며 모델의 크기가 커지고 복잡해졌을 때는 유한 요소법보다 소요되는 시간이 적고 요구되는 컴퓨터의 용량 또한 작다.

(2) 부호규약

Fig. 4.2와 같이 좌측 상단부터 차례로, 수직응력(vertical stress)은 인장이 (+), 전단변형을 및 전단응력은 양의 화살표방향 (+), 축방향 변형을 인장(+)이다. 그 외에 공극수압은 항상(+)이지만 지하수 흐름이 Grid 바깥쪽으로 흐르는 흐름은 (-)이며 중력은 상향이(+)이며 힘, 변위, 속도, 유동벡터 등의 벡터는 X,Y 좌표축의 부호를 따른다.

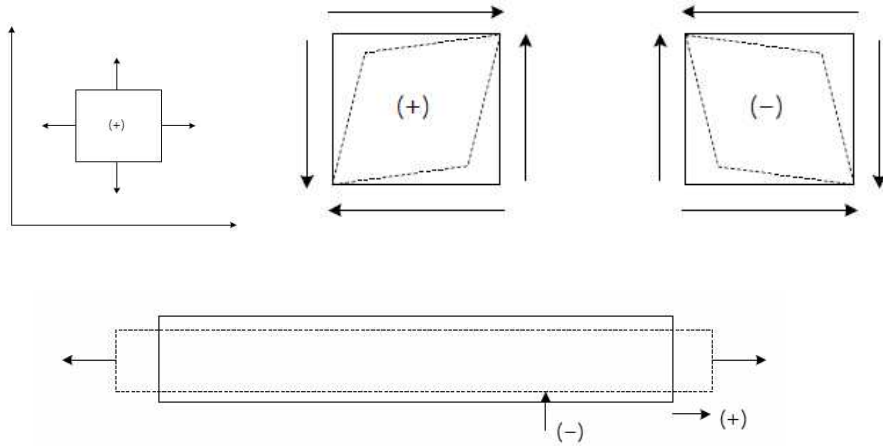


Fig. 4.2 Sign convention of normal stress, shear stress and axial direction displacement, respectively

(3) 계산 순서

FLAC^{2D}는 위에서 언급한 바와 같이 하나의 절점에서 발생한 변화는 인접한 절점에만 영향을 주도록 되어 있다. 예컨대, 하나의 절점에 온도가 증가하였다면 오직 그 주변 절점에만 온도가 증가했다는 것을 인지하게 되어있다. 시간이 경과하고 반복되는 계산에 의해 온도가 상승한 것은 먼 곳의 절점까지도 퍼지게 된다. FLAC^{2D}의 계산 순서는 Fig. 4.3과 같이 나타날 수 있다.

① 해석하고자 하는 범위의 구조물과 부재의 기하학적 형상 및 경계조건, 재료 및 지반의 물성치를 부여한다. ② 지반의 요소를 분할하고 Elastic, Mohr-Coulomb등의 해석모델을 결정하고 경계조건과 초기조건을 부여하여 모델링한다. ③ 분할한 요소에 대하여 각 절점에서 운동방정식에 대한 해가 구해지며 이때 각 절점에서 계산한 힘들은 평형상태가 아니다. ④ 계산된 힘으로 인하여 요소에 가속도가 발생하게 되고 가속

도에 대한 적분이 계산되면서 시간에 대한 절점의 변위 비율이 결정되고 요소의 변형이 정해진다. ⑤ 결정한 모델의 변형과 응력에 대한 구성식에 따라 응력의 증분량이 결정되며 그 증분량으로부터 요소의 각 절점에 불균형한 힘이 전달된다. ⑥위의 과정이 반복되며 불균형 힘이 0으로 수렴되도록 해석이 진행되고 반복된 계산을 통하여 모델은 정적 평형상태에 도달된다.

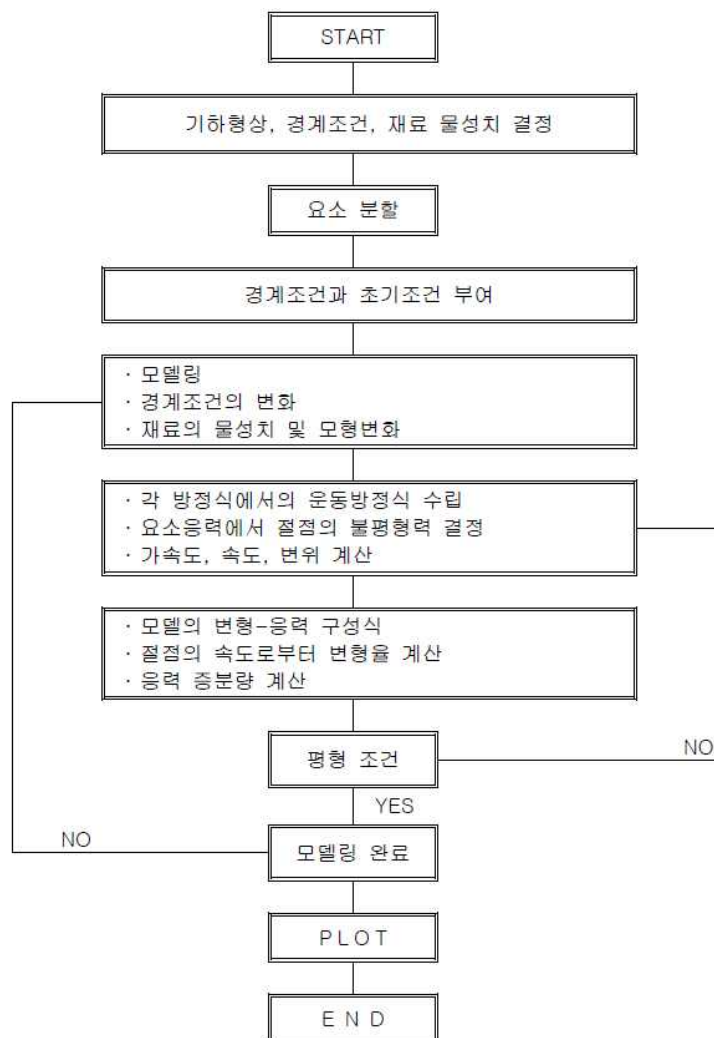


Fig. 4.3 General sequence of interpretation in FLAC^{2D}

4.1.2 수치해석 방법 및 적용타당성 검토

가스하이드레이트 개발을 위한 시뮬레이터는 크게 비상업용으로 미국 로렌스 버클리 국립연구소(Lawrence Berkeley National Laboratory)의 TOUGH+Hydrate와 미국 북서태평양 국립연구소(Pacific Northwest National Laboratory)의 STOMP-HYD가 있으며 상업용으로는 현재까지 CMG(Computer Modeling Group)사의 STAR이 유일하다. 다만, GH 회수생산시 지반거동 해석을 위해서 TOUGH+Hydrate와 FLAC3D를 혼용하여 사용하기도 한다.

하지만 본 논문의 목적은 GH 회수생산시 해저지반거동 예측이므로 토질 및 지반거동 해석 시뮬레이터인 FLAC^{2D}를 선택하였다. FLAC^{2D}는 상변화(phase change) 구현이 불가하므로 다음과 같이 GH 생산 시 감압법 적용 원리 및 몇 가지 가정이 필요하다.

(1) 감압법 적용 원리

Fig. 2.8(b)와 같이 해저지층에 매장되어 있는 GH는 지상으로부터 1.2km아래에 매장되어 있어 geothermal gradient와 상평형 곡선에 의해 Fig. 2.8 우측 상단 원형 그림과 같이 공극사이에 상온 고압상태로 물(염수)과 함께 존재하게 된다.

상온 고압상태의 물과 GH가 존재하는 공극 사이에서 고압의 물을 빼내면(감압하면) 공극내의 압력(pore pressure)이 낮아지면서 GH를 구속하는 압력도 낮아지고 이에 따라 고압조건으로 형성되었던 물 분자 사이에 갇혀있던 가스가 빠져 나오면서 해리되는 것이다.

따라서 이러한 원리를 FLAC에 적용하기 위해서는 공극수압을 낮추는 것이 필수적이다. 다만, FLAC은 고체 상태의 GH가 물, 가스로 해리되는 다상변화를 구현하지 못하므로 가스의 유동 및 GH 변화는 무시한다.

결국 GH를 감압법으로 해리시킨다는 의미는, 공극 속에 갇혀 있는 상온 고압의 물(염수)을 뽑아내면 고체인 GH가 가스와 물로 변하므로 (해리되므로) 이 물까지 모두 뽑아내는 것이다.

따라서 본 논문에서 감압법 적용은 GH 매질의 공극 수압을 평형압력 이하의 목표압력으로 감압하면 Fig. 3.19의 상평형도의 평형압력 6.8 MPa이하에서 부터 해리되는 것이다. 예컨대, 최종감압 압력을 4 MPa로 설정한 경우 공극수압이 6.8 MPa부터 4 MPa까지의 압력상태가 해리되는 것이므로 6.8 MPa 이하의 구역을 해리 후 물성으로 바꾸면서 최종 목표압력인 4 MPa에 도달할 때 까지 최종 침하가 발생하게 된다.

평형압력 6.8 MPa 이하 구역을 해리 후 물성으로 바뀌어야 하는 이유는 FLAC은 GH가 고체에서 액체로 해리되는 상변화를 구현하지 못하므로 해리 전 물성만으로 압밀해석을 하는 경우 실제 지반거동을 반영하지 못하기 때문이다.

이러한 가정이 성립되는지를 판단하기 위해 지질자원연구원에서 실시한 GH 현장시료에 감압법 적용사례(3.2(4): 지식경제부, 2012)에 대한 실험결과를 FLAC^{2D} 수치해석 모사 및 이론해의 산출결과와 비교하고 이하, 적용타당성을 확인한다.

(2) 감압법 적용시 지반의 역학적 거동해석 알고리즘

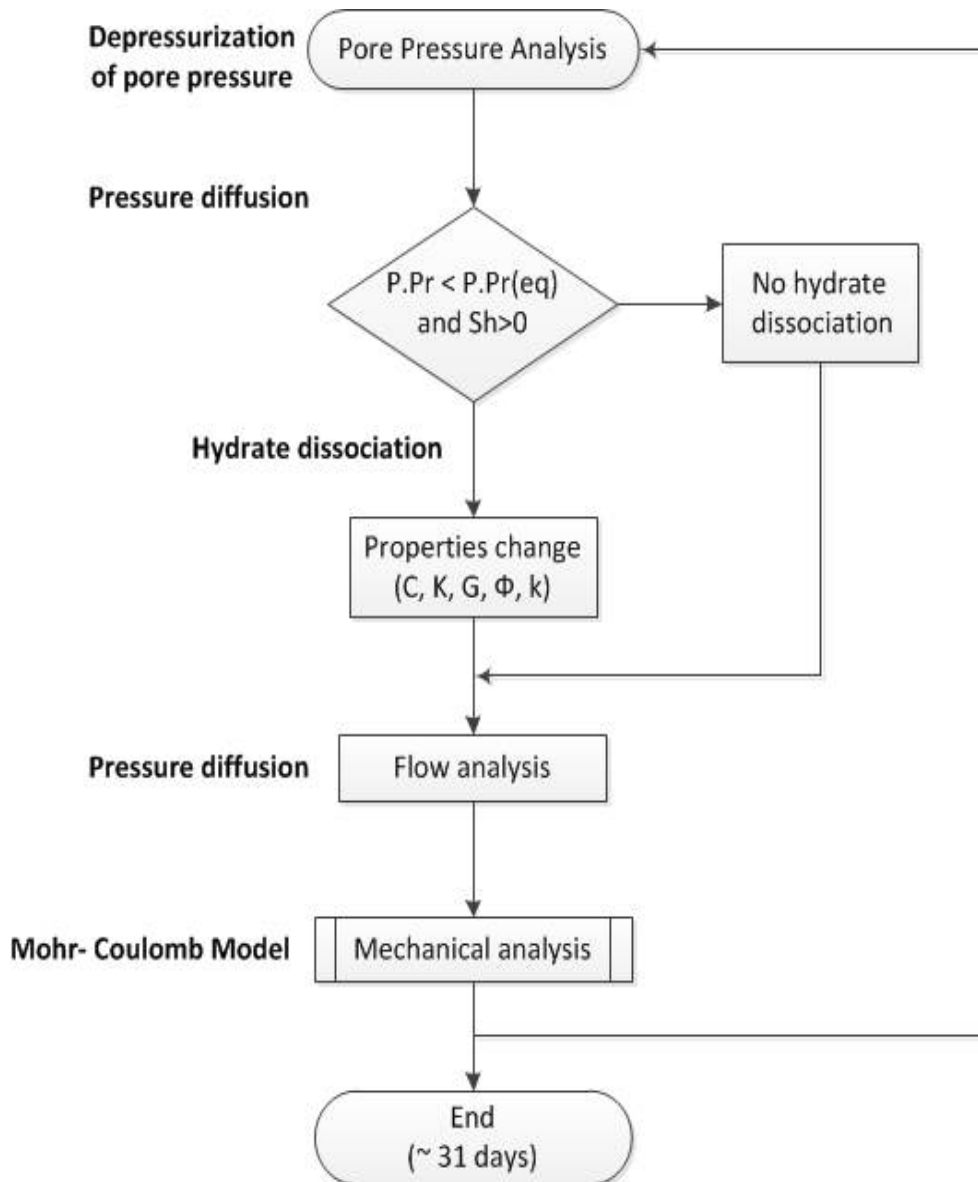


Fig. 4.4 Algorithm for analyzing marine sediment during depressurization process of gas hydrate

(3) 실험결과, 수치해석 및 이론해의 산출결과 비교를 통한 적용 타당성 검토

상기 “3.2(4) 현장시료에 대한 감압법 적용연구(지식경제부, 2011)“에서 울릉분지 현장시추코어시료 침하실험 결과를 FLAC^{2D} 수치해석 모사 및 이론해의 산출결과와 비교하여 적용타당성을 확인하고자 한다. 다만, 상기 보고서에서 실험 시료에 대한 물성자료를 공개하지 않아 본 논문 연구대상인 UBGH-X(울릉분지 GH시추 지역 중 1곳)의 물성자료(일부, 추정 물성값 포함)와 울릉분지 입자크기를 분석한 물성을 활용하여 수치 해석을 실시코자 한다.

① 시추코어 물성 추정을 위한 대상 시료 선택

실트질, 사질, 점토질의 울릉분지 심부시추 현장시료에 감압법 적용 결과 침하량은 Table 3.3와 같다.

본 논문 연구대상의 UBGH-X의 대상 시료가 사질이므로 3가지 시료 중에서 사질에 대한 실험결과를 채택하였다. 수치해석을 모사를 위해 반드시 필요한 주요 파라미터는 점착력, 체적/전단 탄성계수, 마찰각, 공극률, 투수율이며 특히, 점착력, 체적/전단 탄성계수는 GH포화도에 따라 달라진다. 이러한 물성이 보고서(지식경제부, 2011)에 제시되어 있지 않아 GH 포화도, 공극률, 투수율 아래와 같은 방법으로 추정하였다. 추정 방법은 울릉분지 입자크기를 분석하여 당해 입자크기의 인공시료로 실험한 물성을 파악하는 방법이다.

우선 채택한 사질시료의 입자크기를 추정하기 위해 울릉분지 GH 함유시료의 입자크기를 분석한 바, Fig. 4.5와 같이 약 80~120 μ m의 입자사이즈가 가장 많은 것으로 확인 되었다(한국지질자원연구원, 2010)

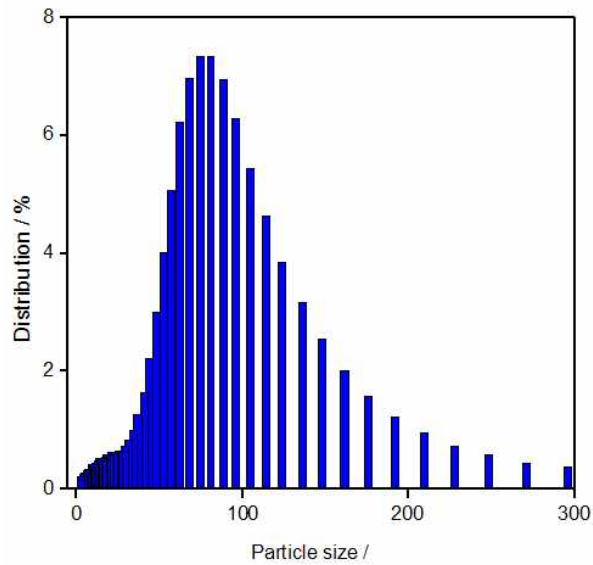


Fig. 4.5 Distribution of Particle size (μm) of gas hydrate sediment at Ulleung basin

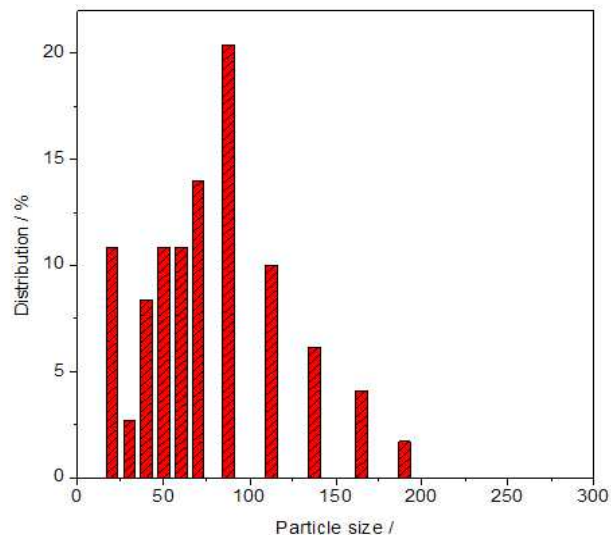


Fig. 4.6 Distribution of particle size of artificial silica sand, Hama sand #8 (μm)

Fig. 4.6와 같이 Hama#8은 입도분포가 울릉분지 입도분포와 유사하므로 Table 4.1와 같이 Hama#8에 관한 물성자료를 취득하여 이에 해당하는 GH 포화도, 공극률, 투수율 데이터로 수치해석을 수행하였다.

Table 4.1. Properties of artificial silica sand used in experiment and simulation

Sediment	Hama #7	Hama #8
Particle [μm]	Mid. 258	Mid. 80
Porosity [%]	42.0	36.0
Permeability[mD]	4,418	244.9
S_{hyd} [%]	Max 24.0 at S_{wi} 30%	Max. 35.3 at S_{wi} 40%

※ Mid: Midian, S_{hyd} : GH saturation, S_{wi} : Water saturation

② 물성값 분석 및 울릉분지 사질시료를 이용한 수치해석 모사 방법

Hama #8 물성자료에서 GH포화도, 공극률, 투수율 값을 활용하였고 전단탄성계수, 체적탄성계수, 점착력은 본 논문 연구대상 후보지인 UBGH-X의 실제 물성을 적용하였다. 다만, 점착력의 해리 후 물성을 알 수 없어 점착력은 일본 Nankai 지역 드릴코어를 이용한 Masui et al.(2006)의 실험식(4.1)을 이용하여 산출하였다 (Table 4.3).

GH가 완전 해리되었다는 것은 GH 포화도(S_h)가 “0” 일 때 의미하므로 해리 후 물성을 구하기 위해 S_h 에 “0” 입력하여 해리 후 점착력 값을 구할 수 있었다.

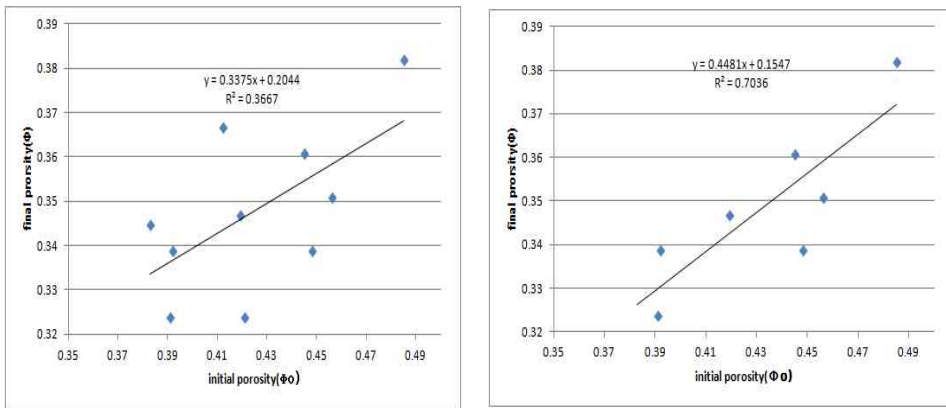
$$\text{Cohesion} \quad c' = S_h \cdot 2.5 \text{ MPa} \quad (4.1)$$

해리 후 공극률과 투수율은 Y. Sakamoto et al.(2008)의 Table 2.4의 실험데이터와 이 실험데이터를 바탕으로 한 추정식(4.2)을 각각 이용하여 산출하였다.

$$K = K_0 \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right)^{N_\phi} (1 - S_h)^N \quad (4.2)$$

$$\ast N = 10.384 S_h^2 - 27.773 S_h + 13.639$$

Hama #8에 해당하는 해리 전 공극률 0.36에 해당하는 실험 데이터가 Table 2.4에 존재하지 않아 상기 데이터를 가지고 회귀식(Fig. 4.7(b), Fig. 4.8)을 만들어 해리 전 공극률 0.36일 때 해리 후 공극률 및 감소벡터를 산출할 수 있었고 이에 따라 투수율을 식(4.2)으로 계산할 수 있었다. 다만, Fig. 4.7의 초기공극률 vs. 최종공극률 그래프의 경우, 경향성에 부합하지 않는 No1,2,9를 outlier로 처리하고 Fig. 4.7(b)의 회귀식을 사용하였다.



(a) Graph reflecting all experimental results

(b) Graph except outliers

Fig. 4.7 Initial porosity vs. final porosity

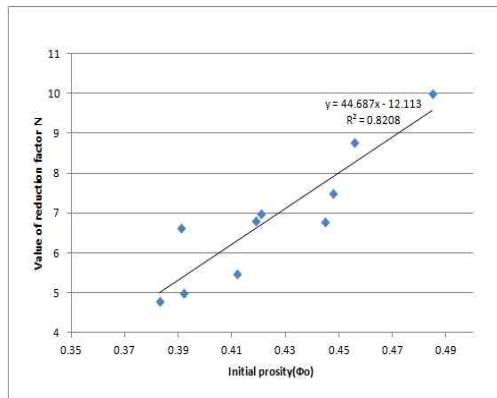


Fig. 4.8 Initial porosity vs. value of reduction factor

Hama #8 해리전 · 후 물성은 Table 4.3과 같이 정리하였다.

밀도 값은 동해 울릉분지 2차 시추지역 자료(Table 4.2 신호진 등, 2012)를 이용하여 전체 unit의 밀도 값에서 가장 큰 값과 가장 작은 값을 빼고 나머지 밀도 값 평균을 구하여 약 2610kg/m^3 이 산출되었다.

Table 4.2(a) Range of units in each well (b) Properties for calculation using sonic log

(a)		UBGH2-2-1	UBGH2-2-2	UBGH2-6	UBGH2-9	UBGH2-10	UBGH2-11
		Depth(mbsf)					
	Unit 1	0~85	0~70	0~141	0~110	0~70	0~153
	Unit 2	85~149	70~170	141~177	110~160	70~140	> 153
	Unit 3	> 149	> 170	> 177	> 160	> 140	

(b)		UBGH2-2-1	UBGH2-2-2	UBGH2-6	UBGH2-9	UBGH2-10	UBGH2-11
		Density(g/cm^3)					
ρ_{ma}	Unit 1	2.63	2.64	2.62	2.61	2.61	2.61
	Unit 2	2.51	2.65	2.67	2.62	2.63	2.56
	Unit 3	2.49	2.70	2.66	2.60	2.54	

Table 4.3 Properties before dissociation and after dissociation

Hama #8	Before dissociation	After dissociation	비 고
Hydrate Saturation	35.3%	0%	Hama #8
Cohesion	0.8825	0	Masui et al., 2006
Friction angle	30°	30°	
Bulk modulus	120.7	10.34	지식경제부, 2012
Shear modulus	72.4	6.2	(단위: MPa)
Porosity	0.36	0.316	sakamoto et al.(2008) ($N_\psi=4$)
Permeability	2.55×10^{-7} m/s	1.41×10^{-6} m/s	

실험조건과 동일하게 반경 25 mm 높이 50 mm를 축대칭으로 구성하고
감압(0 MPa)을 실시하였다.

③ 실험결과와 FLAC^{2D} 해석결과 비교를 통한 적용 타당성 검토 가. 적용 방법

Hama sand #8은 울릉분지 입도 분포와 가장 유사한 실험시료로 한
국가가스공사에서는 이 시료로 다년간 GH 형성실험을 한 결과 이 시료의
GH 최적 형성 초기조건을 경험적으로 도출하였다.

따라서 Hama sand #8의 물성조건을 활용한다면 의당 최적형성 조
건인 공극수압 9.5 MPa, 상재응력(over burden) 10 MPa을 적용하여야
하는 것으로 판단되어 이 응력을 부여하여 Fig. 4.9와 같은 구성 및 조건
으로 수치해석 모사를 수행하였다.

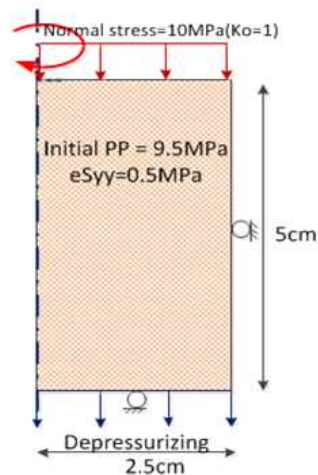


Fig. 4.9 Configuration and boundary condition for verification

실험조건과 동일하게 반경 2.5cm 높이 5cm를 축대칭으로 구성하고 9.5
MPa → 0 MPa으로 감압을 적용하였다.

나. 적용 결과

✓ 1단계 감압(2.76 MPa) 결과

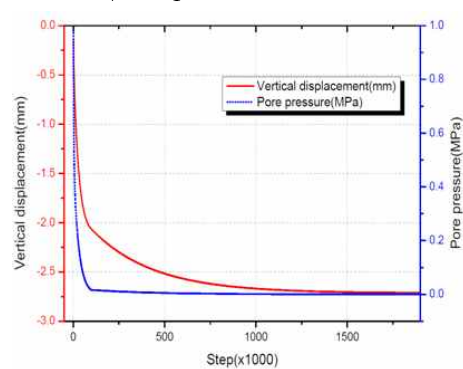
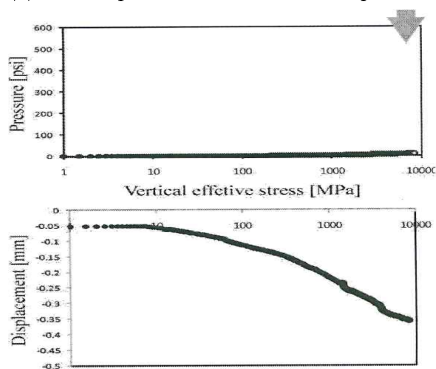
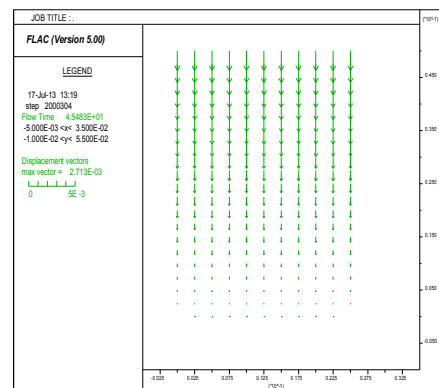
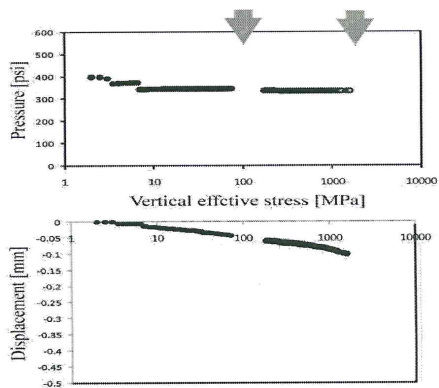
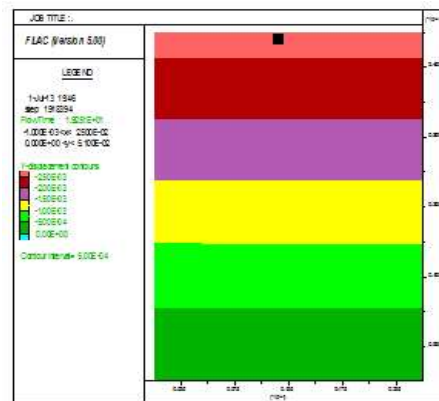
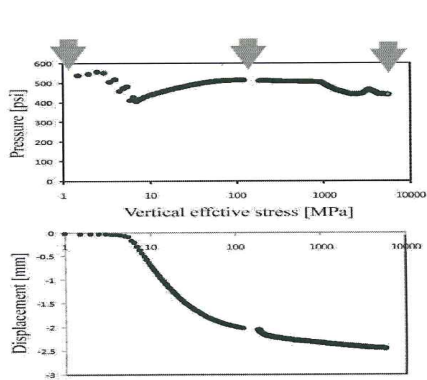


Fig. 4.10 Results of experiment and the simulation

Fig. 4.10(a)는 400 psi(2.76 MPa)까지 감압하였을 때 지수적으로 2.5 mm 침하한 실험 결과 그래프이고 Fig. 4.10(b)는 400psi (2.76 MPa) → 300psi (2.07 MPa)까지 감압하였을 때 0.1 mm 침하(누적침하량 2.6 mm)한 실험 결과 그래프이며 Fig. 4.10(c)는 300psi(2.07 MPa) → 0 MPa까지 감압하였을 때 0.4 mm 침하(누적침하량 3 mm)한 실험 결과 그래프이다.

Fig. 4.10(d)은 Vertical displacement contour로서 상부로 갈수록 침하가 많이 발생하며 최상부가 가장 많이 침하한 것으로 확인되어 최상부 중앙지점(검정색 사각형)을 관찰지점으로 지정하였다. Fig. 4.10(f)에서는 이 관찰지점에 대한 공극압력, 침하량 대, step의 그래프로서 0 MPa까지 감압하였을 때 최종 침하량은 2.713 mm로 확인되었다. Fig. 4.10(e)는 displacement vector를 나타낸 그림으로서 최상부가 가장 침하가 많이 발생하고 아래로 갈수록 점점 침하량이 줄어드는 것을 볼 수 있다.

④ 실험결과와 이론해의 산출결과 비교를 통한 적용 타당성 검토

토질역학(Braja, 1998) 압밀이론 편에서는 포화점토에서 공극을 채우고 있는 물이 빠져나감으로써 발생하는 체적의 변화로 발생하는 침하를 주 압밀침하(primary consolidation settlement)로 정의하였고 1차원 압밀에서 두께가 H인 점토의 주 압밀 침하량을 식(4.3)과 같이 표현하였다.

$$S_p = H \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (4.3)$$

여기서, e_0 = 하중을 재하하기 전 초기 간극비, Δe = 압밀에 따른 간극비 변화량

본 연구도 압밀이론을 바탕으로 수치해석을 수행하였으므로 해리전 후 공극률($\phi_{ini} = 0.36$, $\phi_{fin} = 0.316$)과 시료높이 50 mm를 식(4.3)에 입력하여 주 압밀 침하량을 산출하여 수치해석결과 및 실험결과를 비교함으로써 본 연구의 수치해석 방법의 적용타당성을 확인하였다.

$$S_p = 50 \frac{0.1}{1 + 0.56} = 3.2mm$$

이론해의 계산 값이 3.2 mm로서 실험 결과치인 3 mm, FLAC^{2D} simulation 결과치인 2.713 mm와 유사한 값이 산출된 바, 본 연구의 FLAC^{2D} 해석 방법의 적용타당성이 있는 것으로 판단하여 이하, GH 시험생산 후보 대상지인 UBGH-X(울릉분지 GH 시추지역 중 1곳)의 현장 생산 조건(일부 추정 물성값 포함)으로 수치해석 모사를 실시하였다.

Table 4.4. The results of experiment, analytic solution and numerical analysis

[Unit: mm]

Results	Experiment	Analytic solution	Numerical analysis	remarks
Final subsidence	3	3.2	2.713	amount of settlement

4.1.3 연구대상후보지(UBGH-X)수치해석 모델 구성

울릉분지 GH 시추지역 중 2015년 실시예정인 시험생산이 유력한 후보지 UBGH-X(Fig. 4.11)에 대하여 연구를 수행하였다.

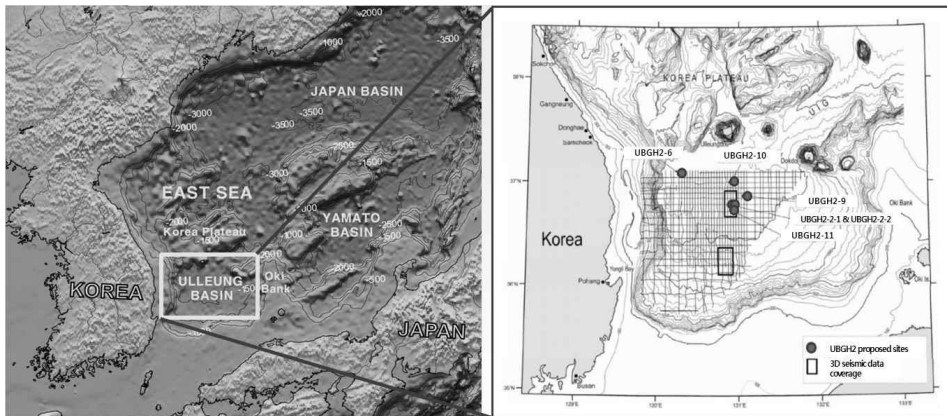


Fig. 4.11. Location of Ulleung basin and information of field investigation (신호진 등., 2012)

(1) 연구대상 후보지(UBGH-X)개요 및 구성

Fig. 4.12에 연구대상 후보지의 상세 정보 및 해석대상 지점의 온도, 압력분포를 도시하였다. 감압법을 이용한 GH 생산 시 고속 감압하면 GH 감압곡선(Sloan, E. D., 1998)을 따라 압력과 온도가 함께 감소(단열 팽창)하게 되며, 반대로 매우 느린 속도로 감압하게 되면 온도 변화가 거의 없이 해리 과정을 거쳐 최종압력에 도달하게 되므로 본 연구는 저속 감압법을 채택하여 해석하였다.

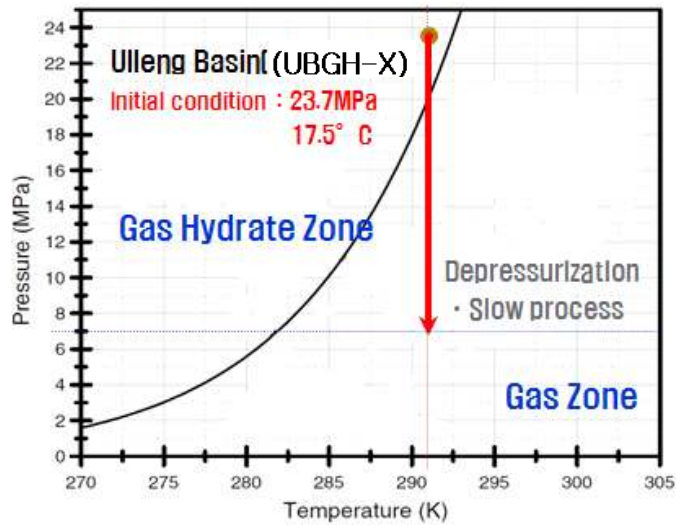


Fig. 4.12 Depressurization at the site UBGH-X

Fig. 4.13은 해석대상(시험생산후보지 UBGH-X)의 개략도로서 지식경제부 GH개발생산 연구(2011)에 개시된 정보를 이용하였다. 해석대상 후보지는 수심 2150 mbss (meter below sea surface), 0~140 mbsf (meter below sea floor) 상부 지층(clay층), 150~170 mbsf GHS (Gas Hydrate Sediment: sand층), 170 mbsf~ 하부지층(clay층)으로 이루어져 있으며 수치해석 영역을 높이 180m 너비 100m의 축대칭 조건으로 결정하였다. 격자는 등간격으로 75×108개 총 8100개로 형성하였고, 경계조건은 Fig. 4.13과 같이 상부는 water permeable boundary인 공극압력과 물 포화도를 고정하였고 양 y축은 x방향고정 x축은 y방향으로 고정하였다.

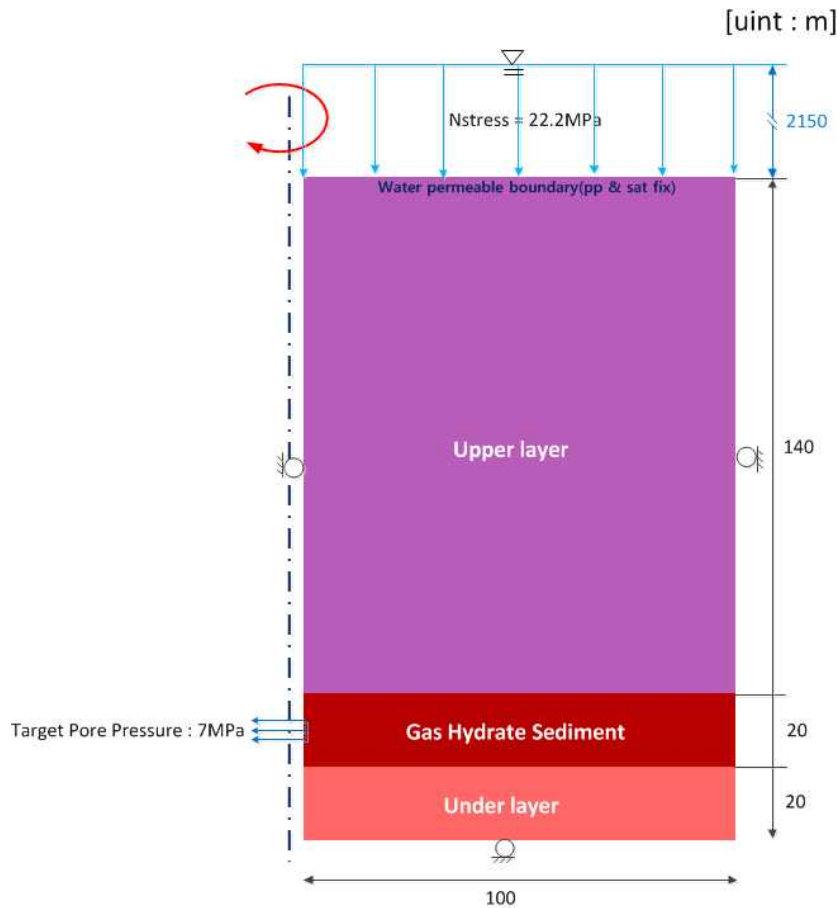


Fig. 4.13 Schematic diagram of the object to be analyzed

(2) 초기조건 및 GH 포화도에 따라 달라지는 입력변수

① 초기온도 및 압력 조건

감압법 적용부위인 150 mbsf 지점의 초기 공극수압 및 초기 온도 값은 각각 23.7 MPa 및 17.5°C이며 초기 온도 값을 Table 4.5의 식(Sloan, 1998)에 입력하면 평형압력이 20 MPa이 산출된다.

Table 4.5 initial condition and variable parameter along hydrate saturation

parameter	value	Source	비 고
Pressure (Initial porepressure)	23.7 MPa	Logging data	mbsf 150m
Temp	17.5°C	Logging data	
Equilibrium Pressure	20 MPa	$P_{eq}^T[kPa] = \exp(\alpha + \beta/T[K])$ $\alpha = 42.047, \beta = -9332$	Sloan, 1998

② 해리전후 물성 값 및 추정식

탄성계수는 지식경제부 보고서를 통해 실제 데이터를 활용하였고 공극률, 투수율 및 점착력은 Table 4.6의 추정식을 활용하였다.

Table 4.6 estimation equations and values before and after dissociation

Parameter	Sign		Value/equation			remarks
GH Saturation ratio	Cohesion(c)		Sand	Clay		Masui et al.,2006 (refer to 3.4(2))
				Upper	Under	
			c'=S _h · 2.5 MPa			
	Bulk modulus	Sh=0	10.34	11.19	8.25	Unit: MPa 지식경제부 ,2012
		Sh=0.5	166.7	166.7	166.7	
	Shear modulus	Sh=0	6.20	6.71	4.95	
		Sh=0.5	100	100	100	
porosity	ϕ		Initial porosity - volumetric strain $\epsilon_{vol} = -\frac{Cc}{1+e_0}log(\frac{\sigma'^{z_0} + \Delta p}{\sigma'^{z_0}})$			지식경제부 ,2012 Lee et al, 2010
Permeability	k		$k = k_0 (\frac{\phi}{\phi_0})^{N_\phi} (1 - S_h)^N$			Sakamoto et al, 2008 (refer to 3.4(1))

③ GH 포화도에 따라 달라지는 입력변수

Table 4.6의 추정식 및 해리전후 물성값에 따라 포화도에 따른 입력 변수를 계산하면 Table 4.7과 같다.

Table 4.7 input parameter along hydrate saturation

Parameter	Upper layer (Clay) 1~140 mbsf	GH layer (Sand) 140~160 mbsf	Under layer (Clay) 160~180 mbsf	Remarks	
GH saturation	3%	50%	3%	신호진 등, 2012	
Friction angle	30°	30°	30°	Experiment test	
Cohesion	0.075	1.25	0.075	Masui et al. 2006	unit : MPa
Bulk modulus	20.52	166.67	17.76	지식경제부, 2012	
Shear modulus	12.31	100	10.66		
porosity	0.76	0.67	0.63	Logging data	
Intrinsic permeability(m/s)	9.9E-11	1.75E-6	9.9E-11	Experimental test	
Grain Density(kg/m ²)	2620	2630	2660	Logging data	
Compressibility	0.93	1.154	0.77	Experimental test	

Sakamoto et al.(2008)의 추정식을 통하여 초기 공극률 0.67에 대한 감소인자를 Fig. 4.14을 통해 유추하였다. Fig. 4.14의 세 개의 선 중 율령분지 입자분포가 가장 유사한 silica sand#8(입자 직경: 0.115 μ m)가 초기 공극률이 0.67일 때 감소인자(N_{ϕ})가 12로 유추 가능하였다.

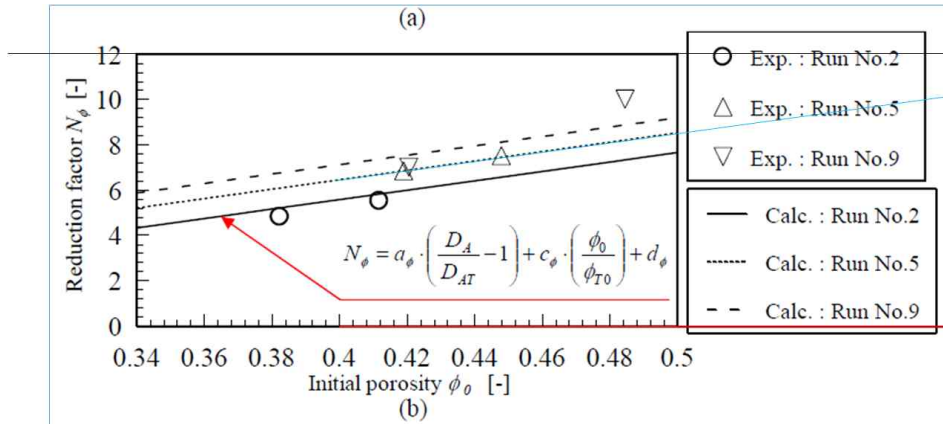


Fig. 4.14 Formulation of reduction factor with respect to porosity ratio (Sakamoto et al., 2008)

또한 Table 4.6에서와 같이 최종공극률(ϕ_{fin}) = 초기공극률(ϕ_{ini}) - 체적변형률(ϵ_v)에서, 체적변형률을 구하기 위해 UBGH-X구역 150 mbsf 위치의 압축률(Cc: 1.154)와 수직유효응력(2.38 MPa)과 공극률(0.67)을 통한 간극비(2.03), 그리고 초기공극수압(23.7 MPa)에서 평형압력(20 MPa)까지의 Δp (3.7 MPa)을 입력하여 최종 공극률(ϕ_{fin})을 산출하면 $\phi_{fin} = 0.515$ 가 되고 초기/최종 공극률, 감소인자를 통하여 해리 후(GH포화도(Sh)=0%) 투수율을 계산하면 투수율은 7.424e-8 m/s가 된다.

Table 4.8 Properties before and after dissociation

properties	before dissociation (Sh=0.5)	after dissociation (Sh=0)	remarks
porosity	0.67	0.515	
permeability	3.44e-7 m/s	7.424e-8 m/s	
reduction fator	12		

4.2 해석 결과

4.2.1 가스하이드레이트 감압시 해저지반 역학적 거동예측

(1) 감압방법에 따른 지반 역학적 거동해석

감압법을 이용한 GH 회수 생산 시 감압방법에 따라 공극수압 감소 속도 및 영향반경이 달라져 GH 해리 속도와 생산량, 지반 및 생산정 주변의 응력/변형률에 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 GH 해리구간 인 150 mbsf 지점의 초기 공극수압 약 23.7 MPa에서 최종목표압력 7 MPa 까지 2 가지 방법에 따른 감압을 하였을 때 1달 동안의 지반 거동을 관찰하였다.

감압방법은 최종 목표 압력 7 MPa 까지 한 번에 감압시키는 방법과 일정속도로 저속 감압시키는 방법을 적용하였다. 또한 감소한 공극수압 및 생산정 주변 수직 변형률 및 공극수압 변화량을 확인하기 위해 Fig. 4.15같이 생산정 해리구간 인접부에 관찰지점을 설정하고 이들 변화량을 확인하였다.

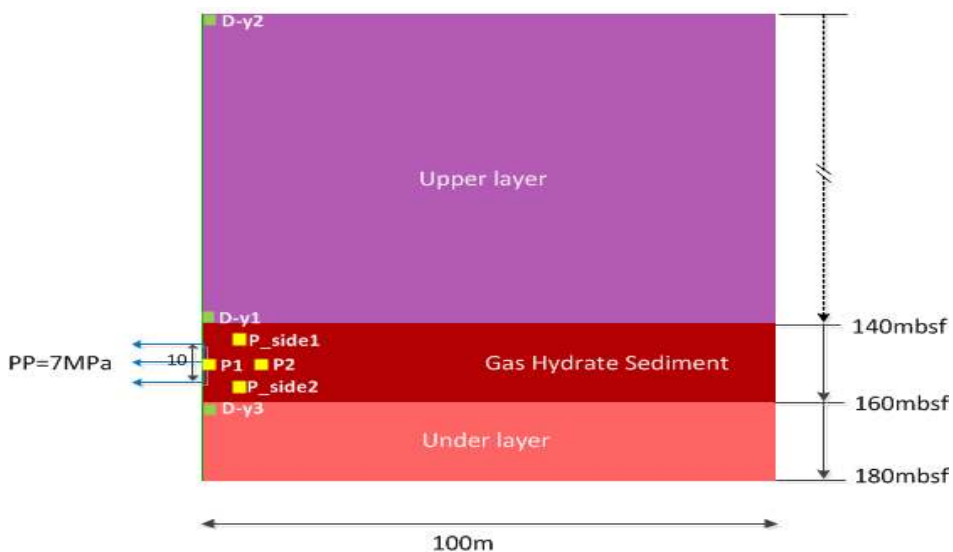


Fig. 4.15 Observation point about pore pressure and vertical displacement

① 감압 방식(고속/저속) 비교

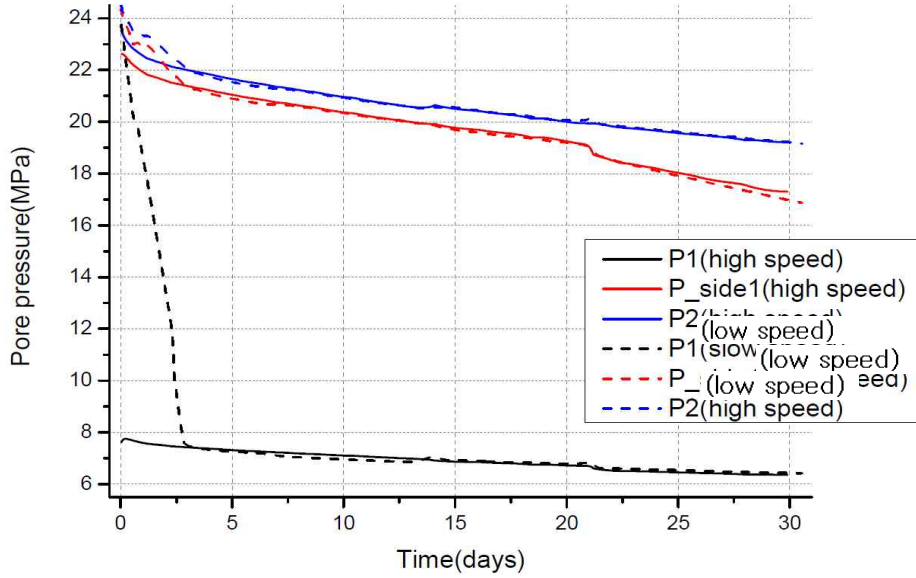


Fig. 4.16 Pore pressure vs. time(days) at high/low speed depressurization

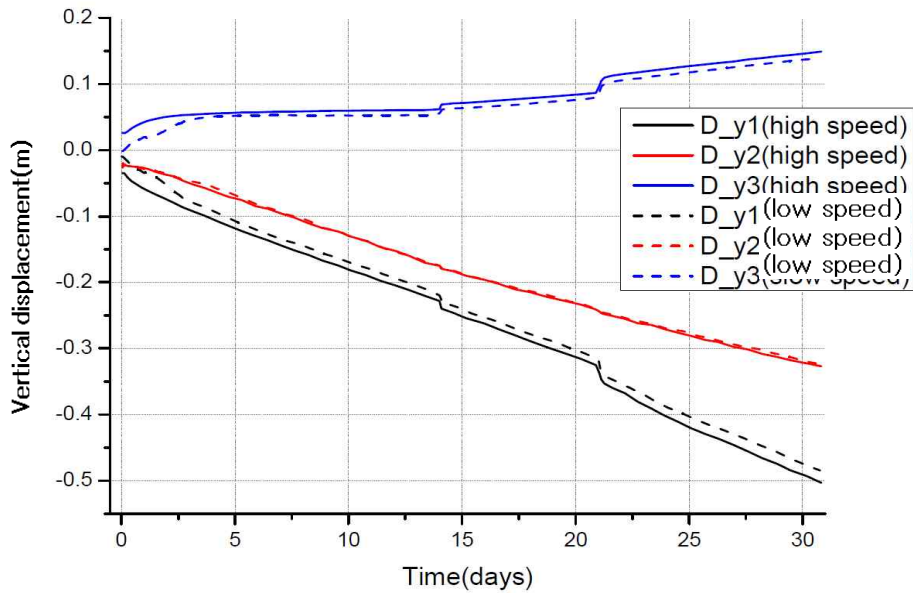


Fig. 4.17 Vertical displacement vs. time (days) at high/low depressurization

Fig. 4.16은 고속 감압과 저속감압(약0.24 MPa/hr → 산출근거: 23.7 MPa(초기공극압력) - 7 MPa(최종목표압력)/3일) 대 시간그래프로 공급수압 변화에 대한 그래프로서, 보는 바와 같이 초기 5일간의 공극압력 변화만이 차이가 날뿐 5일 이후의 압력변화 및 31일경에 최종 도달압력도 유사한 것을 볼 수 있다. 하지만 Fig. 4.17 (수직침하 대 시간그래프)에서는 고속감압의 경우 초기 침하량이 저속감압의 침하량보다 많이 발생하여 결과적으로 최종침하가 31일에 0.503m가 침하하는 것에 비해 저속 감압의 최종침하는 0.484m로 4% 적게 침하되어 저속감압이 특히 초기 지반 안정성에 유리한 것으로 판단된다.

(2) 저속감압 적용 타당성

Fig. 4.17과 같이 저속감압은 고속감압에 비해 지반안정성에 유리하지만, 고속감압은 감압시 펌프 등 생산 설비에 무리를 주며 평형압력(20 MPa)의 40% (12 MPa)이상으로 감압하면 GH 재형성(reformation) 현상으로 인한 압력변화로 인해 메탄 회수생산시 장애를 초래할 수 있다(한국지질자원연구원, 2010). 또한 GH 시험 생산(2015예정)의 최종 목표 예상 압력은 약7 MPa(평형압력의 65%)으로 저속감압(목표 감압 압력 까지 약 2~3일 소요) 실시할 예정이다. 따라서 본 논문에서는 저속감압에 대한 수치해석 모사만을 실시코자 한다.

(3) 연구대상 후보지(UBGH-X) 해저지반 역학적 거동 예측

UBGH-X는 2015년 실시예정인 시험생산의 유력한 후보지로서, Fig. 4.18과 같이 GH 생산 시 발생 가능한 해저 침하로 인해 해저구조물의 (부등) 침하, 시멘트 및 케이싱의 균열, 시멘트-지반 접촉면으로의 가스 누출 등이 발생하므로 시험 시추 공정 계획시 시추공 주변 침하를 예측하는 것은 매우 중요하다.

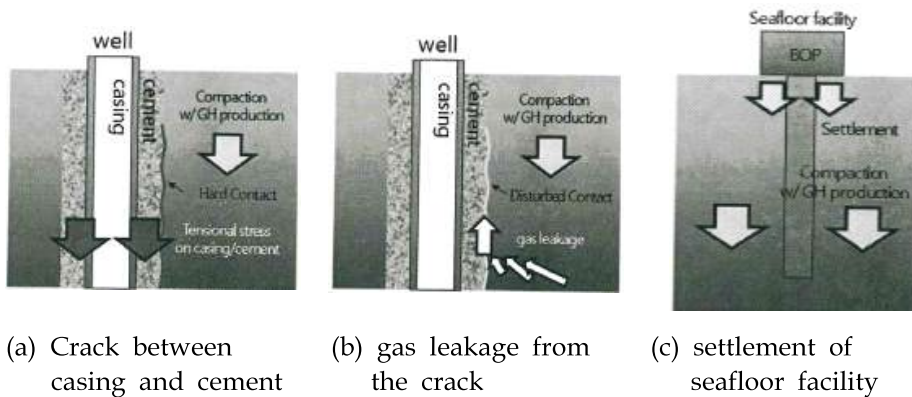


Fig. 4.18 Problems to be expected from settlement due to depressurization process of gas-hydrate (지식경제부, 2012)

따라서 Table 4.9와 같이 초기 및 수직시추조건으로 연구대상 후보지 (UBGH-X)에 대한 수치해석 결과는 다음과 같다.

① 주요 초기조건

Table 4.9 summary of initial condition

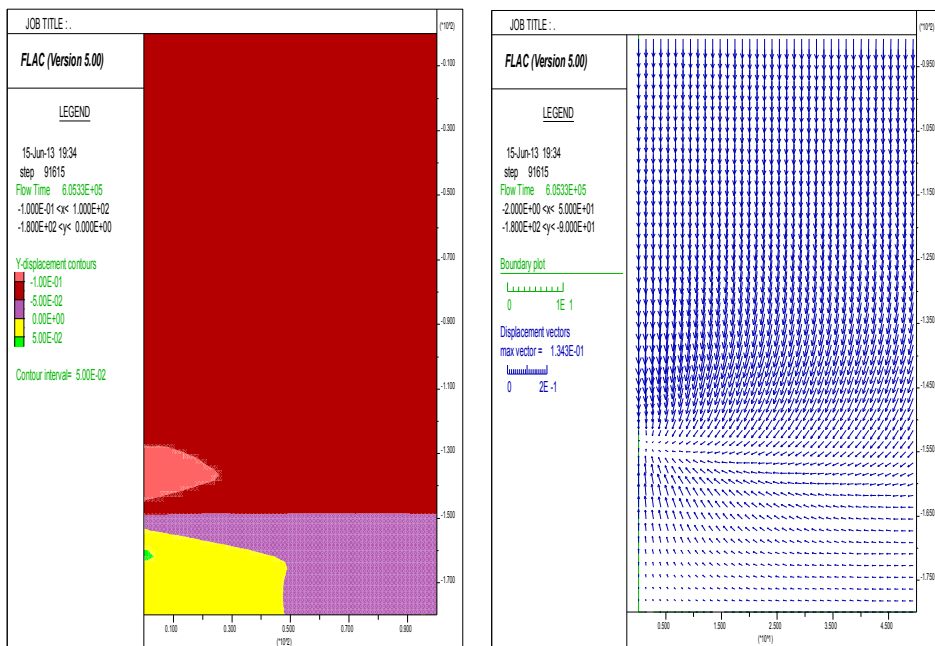
수직시추조건	내 용	비 고
감압방법	저속감압 (약 0.23 MPa/hr)	3일간 23.7 → 7 MPa (평형압력의 80%감압)
생산정 천공부 높이	10 m	생산정 직경 0.1 m
수치해석모사 기간	31일	최대 예상 시험생산기간

조건	Sh(GH포화도)	공극률	투수율	비고
초기조건	0.5	0.67	3.44e-7 m/s	해리전
최종조건	0	0.515	7.424e-8 m/s	해리후

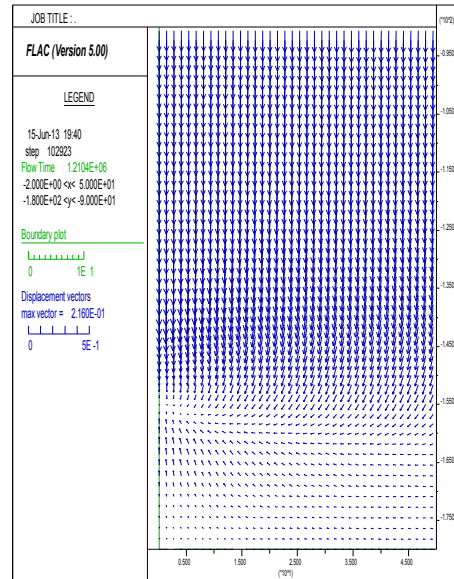
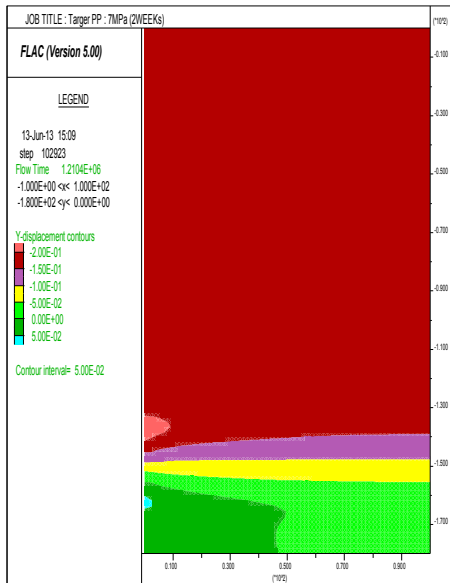
② 수치해석 결과

가. 수직침하(vertical displacement) contour

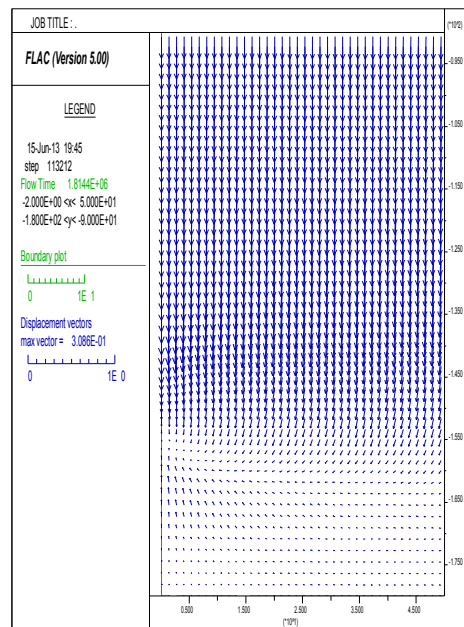
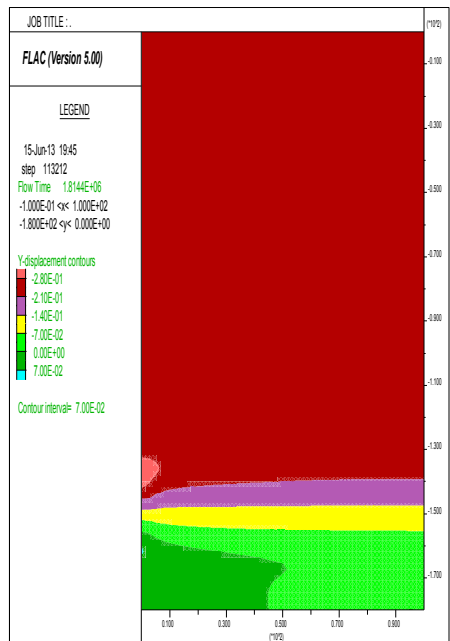
Fig. 4.19와 같이, Vertical displacement contour에서는 gradient가 주황색으로 갈수록 수직변위가 많이 발생하고 녹색으로 갈수록 수직변위가 적게 발생하는 것을 볼 수 있고 거시적으로 수치해석 전체영역(너비 100 m, 높이 180 mbsf)이 확인 가능하도록 도시하였다. displacement vector에는 주요관심 구역인 감압법 적용부위를 미시적으로 관찰하기 위해 시추공을 중심으로 너비 50 m 및 높이 90~180 mbsf에 해당하는 변위벡터를 도시하였다.



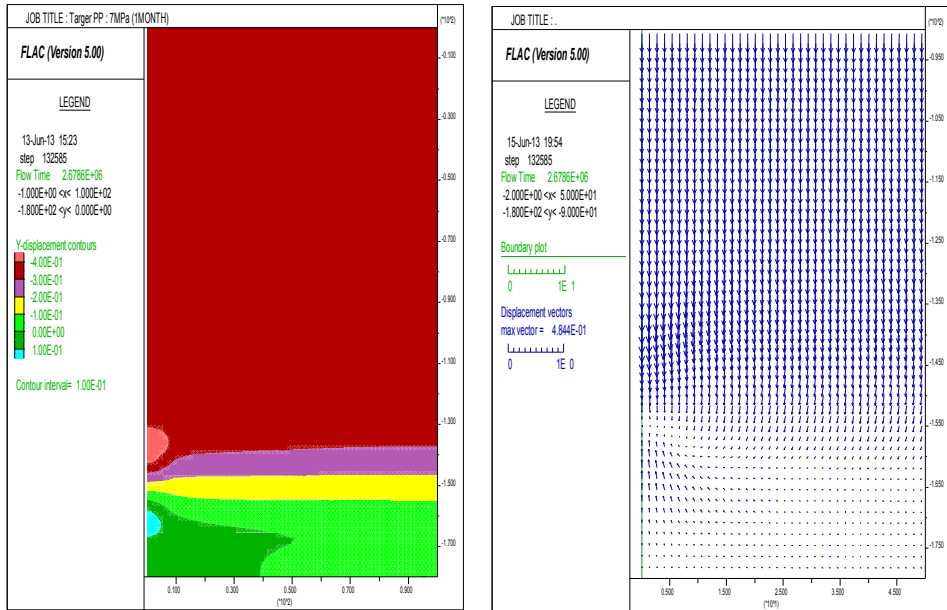
Vertical displacement contour (100x180) displacement vector (50x90)
(a) 1 week



Vertical displacement contour (100x180) displacement vector (50x90)
(b) 2 weeks



Vertical displacement contour (100x180) displacement vector (50x90)
(c) 3 weeks



Vertical displacement contour (100x180) displacement vector (50x90)
(d) 1 month

Fig. 4.19 Vertical displacement contour and displacement vector of depressurization to 7 MPa

상기 수직 침하 contour에서와 같이 GHS (Gas Hydrate Sediment) 구역 직 상부(140 mbsf)에서 가장 많은 침하가 발생하고 최대 침하가 발생하는 지점부터 상부지층(Upper layer)로 올라갈수록 침하가 점점 줄어들다가 120~0 mbsf까지는 침하가 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다.

이는 상부지층은 GH가 3%만을 함유된 체적탄성계수가 17.8 MPa에 불과한 연약지반의 미고결층으로서 침하하는 부분을 지지하지 못하고 흘러내려서 침하부위를 메우면서 함몰부위를 형성하지 않고 일정하게 침하되는 것으로 판단된다.

한편 GHS 생산부 하단 하부지층(under layer) 부분(160 mbsf)은 오히려 아주 작은 양이지만 융기되는 것을 볼 수 있는데, 이는 생산정 주변에서 GH가 해리되면서 가스와 물이 차압으로 인해 Fig. 4.20과 같이

생산정 천공부 쪽으로 비스듬하게 상향 유동이 발생하면서 연약지반의 미고결층의 하부지층도 함께 끌어올리기 때문에 판단된다.

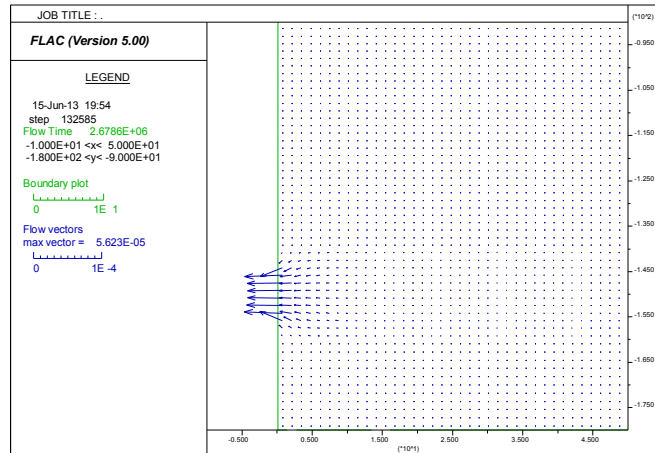
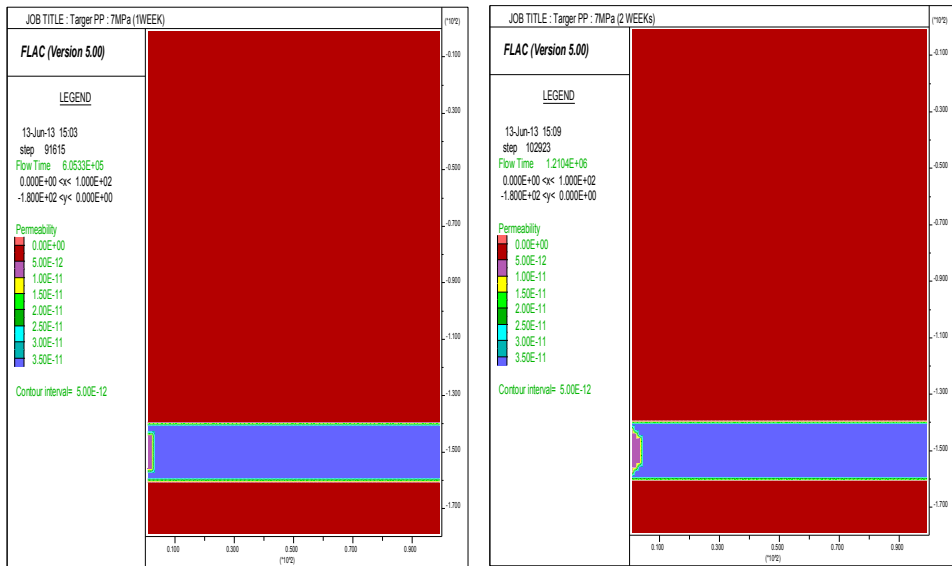


Fig. 4.20 Flow vector (50x100)

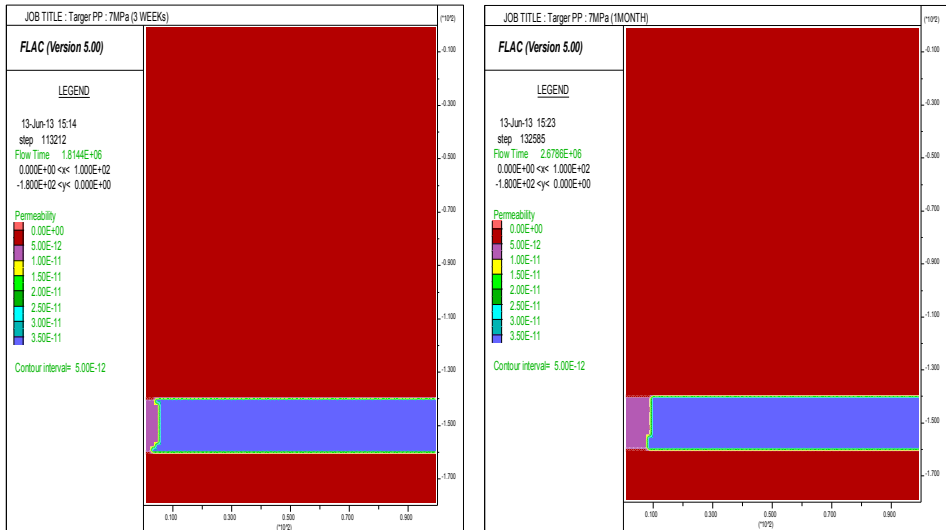
나. 수평해리 전파(투수율변화) contour

Fig. 4.21과 같이 1주부터 1달(31일 기준)을 기준으로 해리 전파영역을 살펴본 바, 처음 1주는 약 3일간 저속감압을 실시함으로 3일째부터 본격적인 감압이 실시되므로 상대적으로 적은 해리영역을 볼 수 있으나 2주 후부터는 해리영역이 생산정 천공부 부근부터 우선 수평방향으로 해리 영역이 확장되고 3주째에는 감압이 보다 진행되면서 수직방향으로 해리 영역이 연장되고 마지막 1달째에는 수평 수직방향 전체로 해리가 진행되는 것을 볼 수 있다. 하지만 1달 동안 해리하여도 약 10 m 이내에서 해리되는 것을 볼 수 있다. 이는 아래 Fig. 4.22는 생산정 천공부의 초기 수평 유효응력 및 수직유효응력을 도시한 그래프로 수평 및 수직유효응력이 각각 3.16 MPa에서 17.7MP 그리고 3.58 MPa에서 19.2 MPa로 증가하는 것을 볼 수 있듯이 해리 시 상부 overburden의 압밀작용으로 수직 및 수평 유효응력이 증가되고 이로 인해 투수율이 감소된다는 감소인자 이론을 적용

함으로써 실제 현장조건인 2150 mbss (meter below sea surface)의 해수와 140 mbsf (meter below sea floor) 상부지층 지반 압축으로 sand입자가 clogging을 일으켜 투수율이 감소되기 때문으로 판단된다.



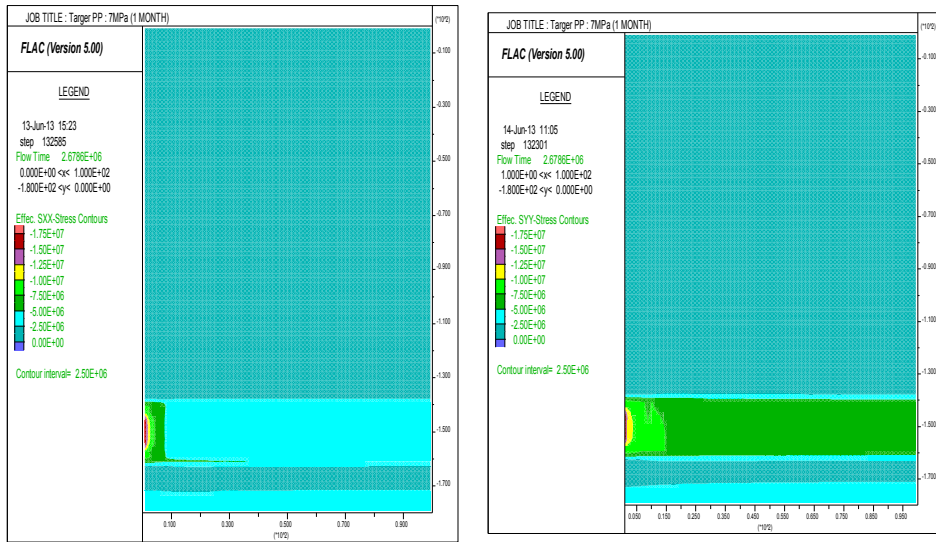
(a) 1week: horizontal dissociation up to 2.67m (b) 2nd week: horizontal dissociation up to 4m



(c) 3rd week: horizontal dissociation up to 5.3m (d) 1month: horizontal dissociation up to 9.3m

Fig. 4.21 Permeability change (range of diffusing dissociation)

다만 Fig. 4.23에서 유효응력이 3일까지 급격히 증가하다가 천천히 증가 하는 이유는 3일부터 31일까지 감압을 7 MPa로 일정하게 유지시키면서 유효응력이 평형상태를 찾아가기 때문인 것으로 생각된다.



(a) effective horizontal stress contour at 1 month (b) effective vertical stress contour at 1 month

Fig. 4.22 Contour in effective horizontal stress at 1 month

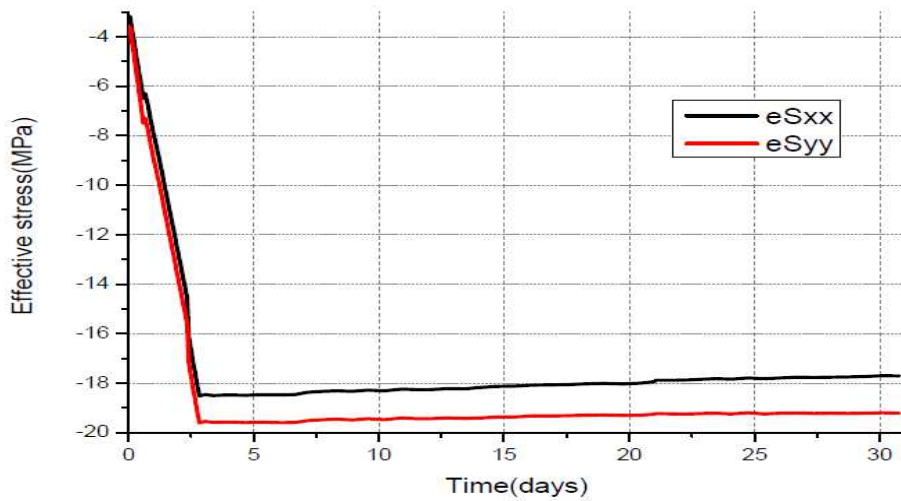


Fig. 4.23 Effective vertical/horizontal stress vs. time at part of perforation of production pipe

다. 지반거동 분석

그리고 1주~1달간의 GHS 직상부, 최상부 지층 및 하부지층의 수직 상승량을 보다 면밀하게 분석하기 위하여 Fig. 4.15와 같이 관찰지점을 지정하고 침하 등의 추이를 아래와 같이 분석한다.

Fig. 4.24는 저속감압(0.23 MPa/hr) 하여 약 3일째 되는 날에 목표압력인 7 MPa로 공극압력을 감압하는 그래프로서 평형압력 20 MPa을 지나면서 압력 약간의 교란이 일어나는 것을 볼 수 있는데 이는 GH가 해리되면서 물성이 바뀌며 특히, 유효응력 증가로 sand clogging이 발생하면서 투수율이 낮아지는 것이다.

Fig. 4.24과 같이 생산부에 가장 인접해 있는 P1은 감압이 빠르게 일어나서 평형압력인 20 MPa에 도달하는 시간이 짧아 해리가 급속히 진행되지만 생산부에서 4m 이격된 P_side1 및 P_side2는 약 14일이 경과하여야 해리되고 생산부에서 8m 이격된 P2는 21일이 지난 후에야 평형압력에 도달하여 해리되는 것을 알 수 있다.

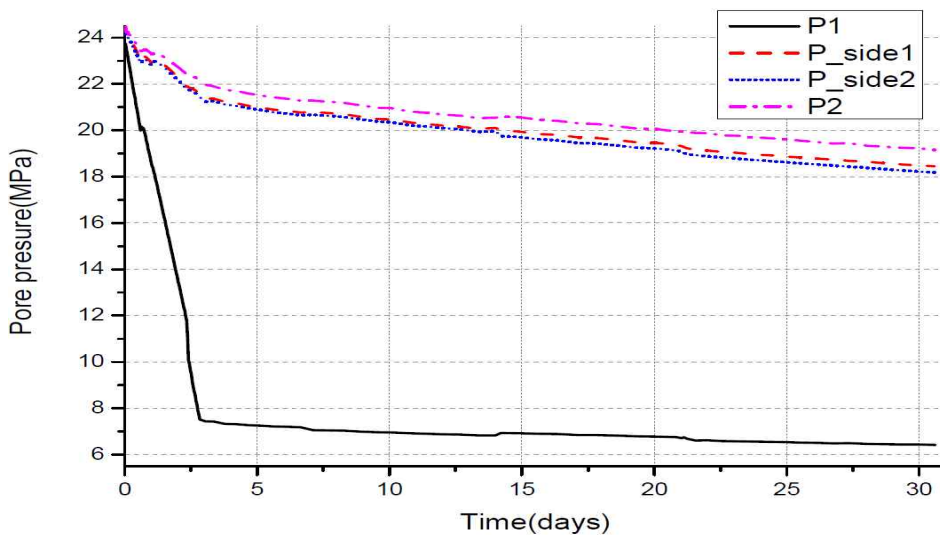


Fig. 4.24 Pore pressure vs. time (1 month)

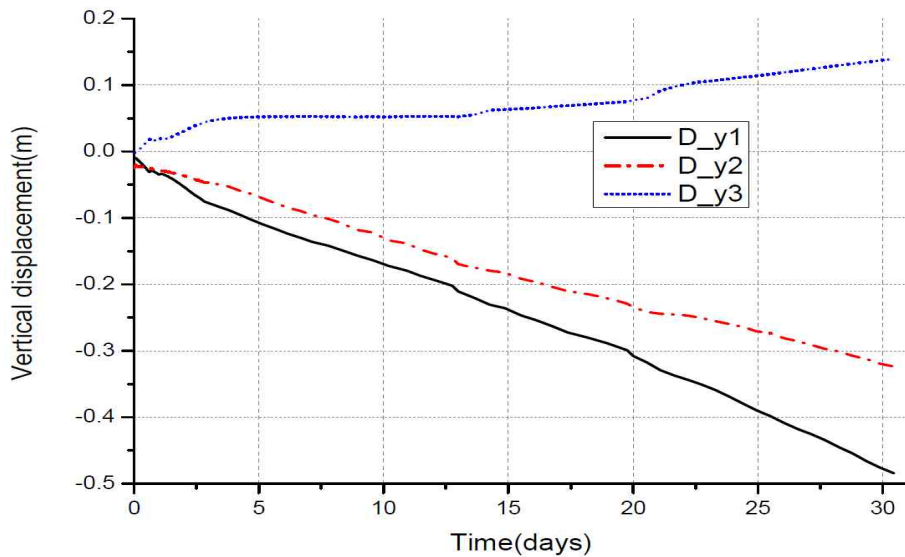


Fig. 4.25 Vertical settlement vs. time (1 month)

Fig. 4.25는 시간경과에 따른 수직 침하량을 보여주는 그래프로서 GHS 직상부(D_y1)가 0.48m로 가장 많이 침하되고 최상부(D_y2)는 미고결 연약지층으로 인해 최대 침하되는 GHS 직상부(D_y1)의 침하를 유지시키지 못하고 흘러내려 D_y1보다 적은 0.324m가 침하되는 것을 볼 수 있으며 GHS 하부(D_y3)는 적은 양이지만 약 0.14m 융기되는 것을 볼 수 있다. 이는 상부로 가스 및 물을 suction하는 압력으로 인해 유체의 유동이 좌측상향으로 발생하기 때문으로 판단된다.

Table 4.10 summary of results

[unit: m]

	1week	2weeks	3weeks	1month	remarks
Max. subsidence	0.136	0.22	0.317	0.484	D_y1
range of dissociation	2.67	4	5.3	9.3	horizontal direction

4.2.2 연구대상 후보지(UBGH-X) Parametric Study

지금까지는 UBGH-X의 실제 물성 데이터(일부 추정 물성지 포함)를 가지고 '15년 시험생산에서 실제 적용예정인 공저압(Pw) 7 MPa으로 지반 역학적 거동을 해석해 보았다. 하지만, '15년 시험생산을 위한 시험시추 공정계획이 확정되지 않았으므로 예상 공저압(Pw) 7 MPa을 기준으로 10 MPa 및 4 MPa에 대한 지반 역학적 거동해석을 실시하여 공저압 변화에 대한 해리전파범위 및 침하 등의 경향성을 분석하고 아울러, 지반 거동해석에서 가장 중요한 파라미터인 공극률, 투수율, GH포화도 변화에 따른 침하 등의 경향성을 아래와 같이 분석코자 한다.

Table 4.11 Summary of parametric study

Parametric study	High	Middle	Low	비고
Case 1 Pw(공저압)	10 MPa	7 MPa	4 MPa	7± 평형압력15% MPa
Case 2 porosity	0.64	0.67	0.71	신호진등, 2012
Case 3 permeability	0.5K	K	1.5K	
Case 4 Sh	0.6	0.5	0.4	0.5 ± 0.1

(1) 공저압(Pw)에 따른 지반 역학적 거동해석

① 목표압력 10 MPa(평형압력의 50%)

가. 주요 구성 조건

Table 4.12 summary of initial condition

	내 용	비 고
감압방법	저속감압(약 0.19 MPa/hr) ※[초기공극수압(23.7 MPa)-최종 목표감압압력(10 MPa)]/3일	3일간 23.7→10 MPa (평형압력의 50%)
생산정 천공부 높이	10 m	생산정 직경 0.1 m
수치해석모사 기간	31일	최대 예상 시험생산기간

조건	Sh(GH포화도)	공극률	투수율	비고
초기조건	0.5	0.67	3.44e-7 m/s	해리전
최종조건	0	0.515	7.424e-8 m/s	해리후

나. 수치해석결과

✓ 수직침하 contour

Fig. 4.26 는 목표 공극압력을 10 MPa로 저속감압 하였을 때의 수직변위를 나타내는 contour이다. 지반 거동 양상은 목표공극수압 7 MPa와 유사하게 GHS직상부에서 침하가 가장 많이 발생하며 해저면으로 상승하면서 침하가 감소하는 패턴을 보여주고 있다. 1주내지 3주까지의 거동은 지반침하 차이만 있을 뿐이지 유사한 패턴으로 침하 contour를 나타내므로 이하, Vertical displacement contour는 최종 1달만의 contour만을 보여주기로 한다.

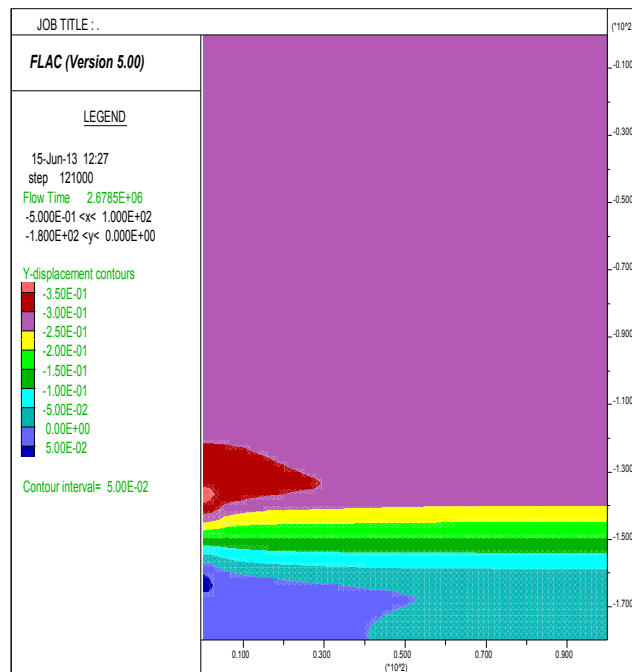
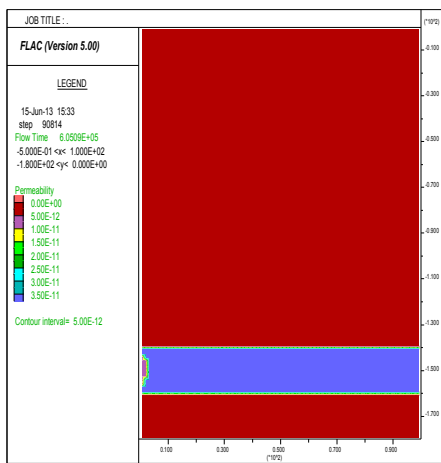


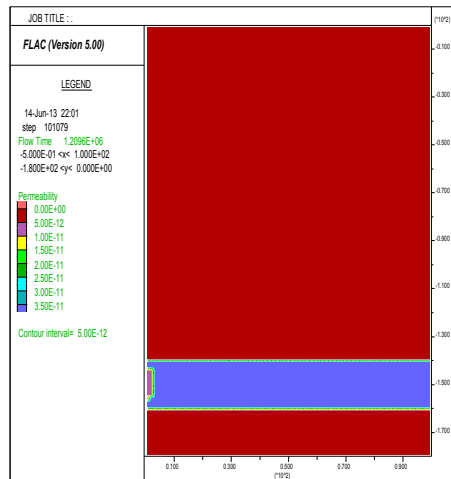
Fig. 4.26 Vertical displacement at depressurization to 10 MPa (1month)

✓ 해리전파(투수율 변화) contour

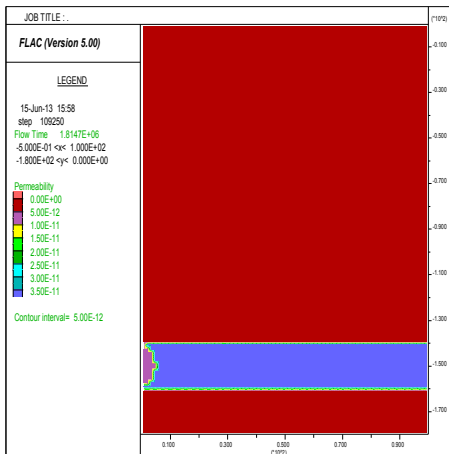
Fig. 4.27와 같이 해리 전파영역을 살펴본 바, 처음 1주는 해리전파가 2.6m 전파되다가 2주에서는 해리전파 거리는 2.6m로 동일하지만 해리범위가 약간 팽창하는 것을 볼 수 있고 3주 및 1달까지 각각 5.2m, 6.5m의 해리 전파도를 보였다. 1주 내지 2주간의 해리 전파도가 비교적 적고 3주 및 1달까지의 해리 전파도가 큰 것을 볼 수 있다.



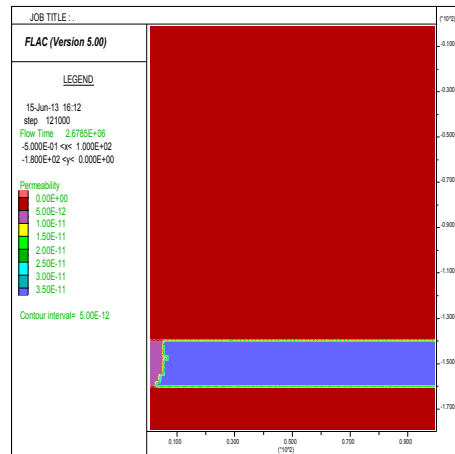
(a) 1st week: horizontal dissociation up to 2.6m



(a) 2nd week: horizontal dissociation up to 2.6m



(c) 3rd week: horizontal dissociation up to 5.2m



(d) 1month: horizontal dissociation up to 6.5m

Fig. 4.27 Permeability change (range of diffusing dissociation)

Fig. 4.15와 같이 GH 생산부 인접 지점(P1), 4m이격된 P_side1/P_side2, 8m 이격된 지점에서의 압력 추이를 아래 Fig. 4.28과 같이 살펴본다. 목표감압 7 MPa에 비해 P_side1 및 P_side2도 압력 변동(fluctuation)없이 완만하게 하강 하는 것을 볼 수 있다. 이는 목표감압 7 MPa 압력차가 23.7→7 MPa(ΔP : 16.7 MPa)에 비해 압력차(ΔP)가 13.7 MPa에 불과하므로 압력변동이 적은 것으로 판단된다.

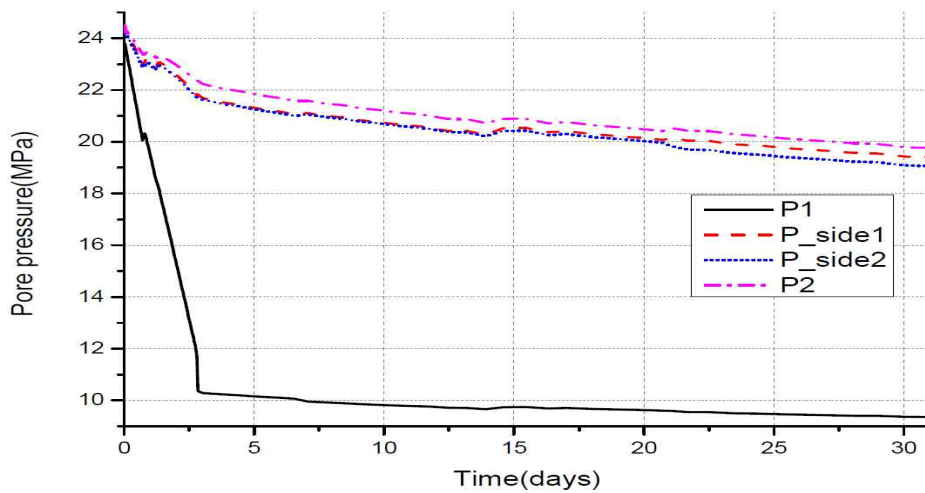


Fig. 4.28 Pore pressure vs. time (1 month)

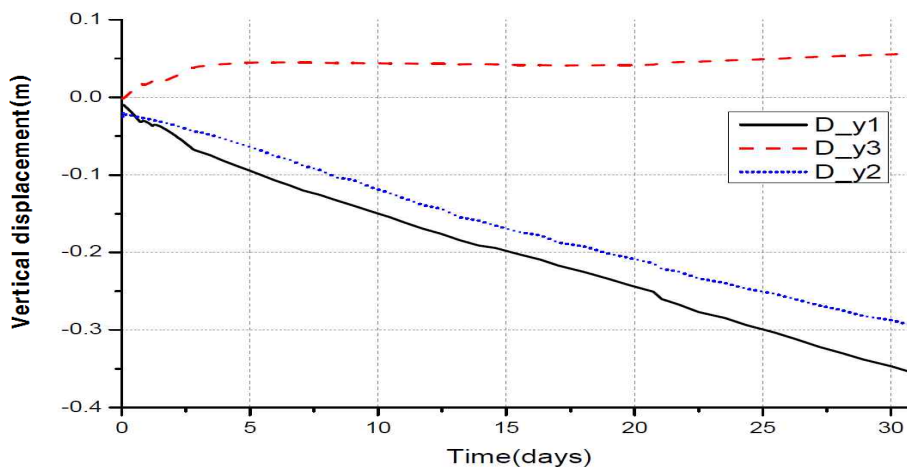


Fig. 4.29 Vertical displacement vs. time (1 month)

Fig. 4.29는 최대 침하부위인 GHS 직상부 D_y1와 최상부 D_y2와 GHS 직하부 D_y3의 관찰부위에 대한 시간 대 수직침하 그래프로서, 목표감압 7 MPa의 최종 수직변위인 0.48 m에 비하여 훨씬 적은 0.357 m가 침하되었으며 이는 감압 ΔP 가 적어지면 그만큼 해리되는 구역이 적어지고 따라서 침하량도 줄어드는 뚜렷한 경향성을 보여준다.

Table 4.13 Summary of results for pw=10 MPa [unit: m]

	1week	2weeks	3weeks	1month	remarks
Max. subsidence	0.12	0.91	0.26	0.375	D_y1
range of dissociation	2.6	2.6	5.2	6.5	horizontal direction

② 목표압력 4 MPa(평형압력의 80% 감압)

가. 주요 초기조건

Table 4.14 Primary initial conditions

	내 용	비 고
감압방법	저속감압 (약 0.27 MPa/hr) [초기공극수압(23.7 MPa)-최종 목표공극수압(4 MPa)]/3일	3일간 23.7→4 MPa (평형압력 80% 감압)
생산정 천공부 높이	10 m	생산정 직경 0.1 m
수치해석모사 기간	31일	최대 예상 시험생산기간

조건	Sh(GH포화도)	공극률	투수율	비고
초기조건	0.5	0.67	3.44e-7 m/s	해리전
최종조건	0	0.515	7.424e-8 m/s	해리후

나. 수치해석결과

✓ 수직침하 contour

Fig. 4.30은 목표 공극압력을 4 MPa로 저속감압(약 0.27 MPa/hr) 하였을 때의 수직변위를 나타내는 contour이다.

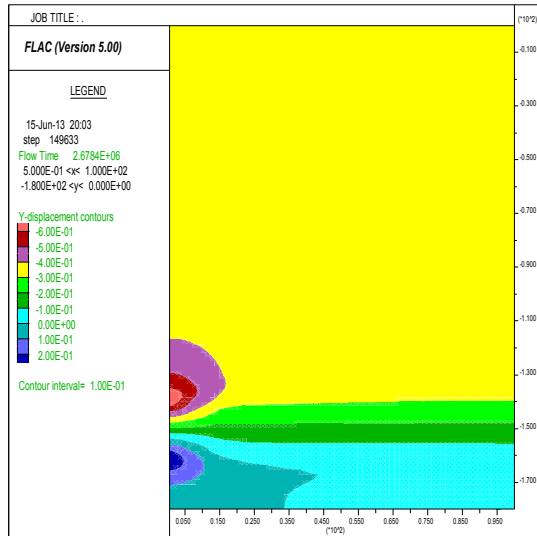
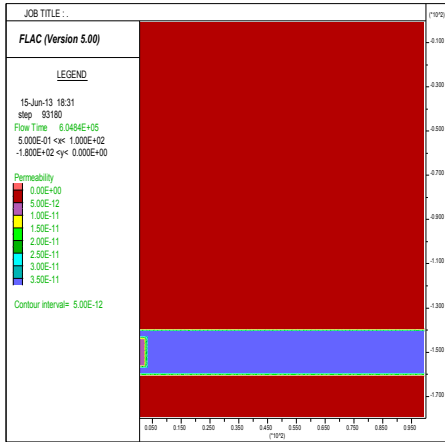


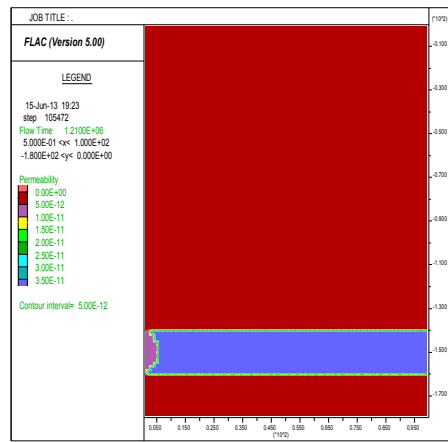
Fig. 4.30 Vertical displacement at depressurization to 4 MPa (1month)

✓ 해리전파(투수율 변화) contour

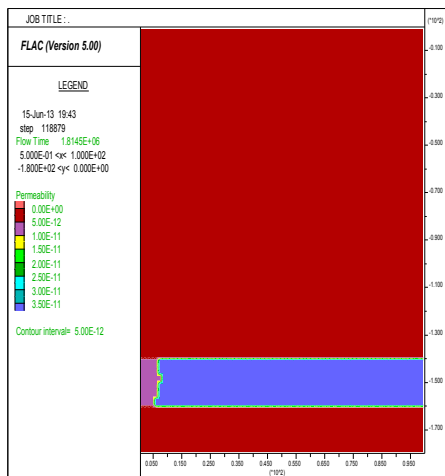
Fig. 4.31와 같이 해리 전파영역을 살펴본 바, 처음 1주는 해리전파가 2.67 m, 2주는 5.32 m, 3주는 8 m로 비교적 일정하게 전파되다가 4주째에는 해리 전파 발생이 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 다른 감압목표압력(7 또는 10 MPa)에 비해 ΔP 가 크므로 인해 발생하는 현상으로 사료되며 이 때문에 Fig. 4.33에서와 같이 21일 이후에 시추공 천공부 직상부(Dy_1)에서 급격하게 침하가 발생하는 것을 볼 수 있는 바, 과도한 감압으로 판단되며 감압방법으로 바람직하지 않은 것으로 판단된다.



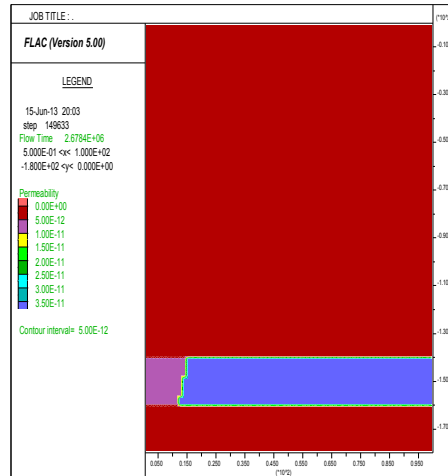
(a) 1st week: horizontal dissociation up to 2.67m



(b) 2nd week: horizontal dissociation up to 5.32m



(c) 3rd week: horizontal dissociation up to 8m



(d) 1month: horizontal dissociation up to 14.63m

Fig. 4.31 Permeability change (range of diffusing dissociation)

Fig. 4.15 와 같이 GH 생산부 인접 지점(P1), 4m이격된 P_side1, 8m 이격된 지점에서의 압력 추이를 아래 Fig. 4.32와 같이 살펴본다. 목표 감압 7 MPa 및 10 MPa에 비해 P_side1, P_side2 및 P2의 압력 변동(fluctuation)이 20일 이후부터 약간 심해지는 것을 볼 수 있다. 이는 목표감압 7 MPa의 압력차가 23.7→7 MPa(ΔP : 16.7 MPa)에 비해 압력차(ΔP)가 19.7 MPa로 극심하므로 발생하는 현상으로 판단된다.

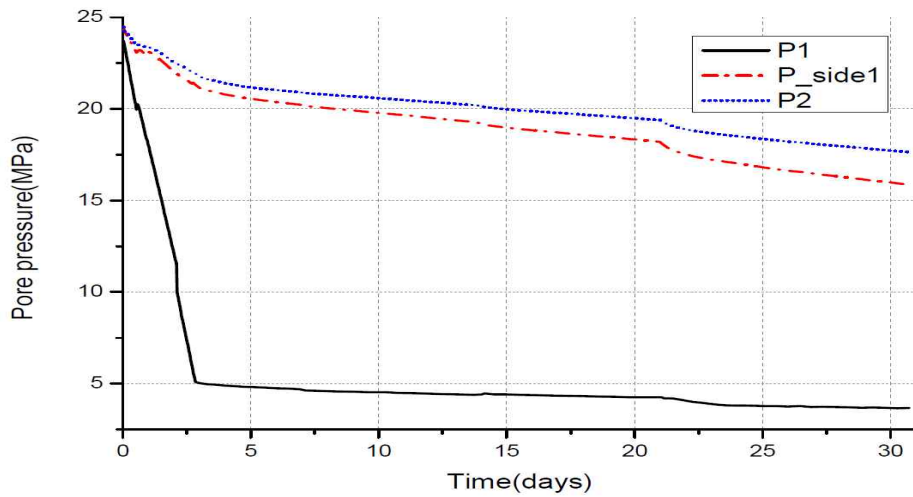


Fig. 4.32 Pore pressure vs. time (1 month)

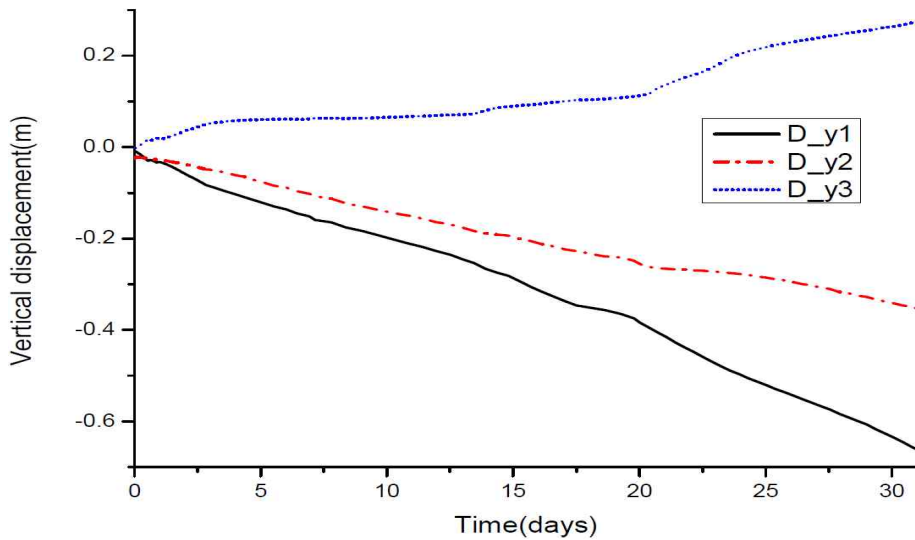


Fig. 4.33 Vertical displacement vs. time (1 month)

Fig. 4.33는 최대 침하부위인 GHS 직 상부 D_y1와 최 상부 D_y2와 GHS 직 하부 D_y3의 관찰부위에 대한 시간 대 수직침하 그래프로서, 목표감압 7 MPa의 최종 수직변위인 0.48 m에 비하여 훨씬 많은 0.66 m가 침하되었으며 이는 감압 ΔP 가 커지면 그만큼 해리전파 구역이 커지고 따

라서 침하량도 커지는 뚜렷한 경향성을 보여준다. 특히, 20일이 경과하는 경우 압력 변동(fluctuation)이 극심해지고 이에 따라 수직침하량도 커지는 것을 확인할 수 있는데 이는 평형압력 대비 감압 ΔP 가 과도한 경우 GH 재형성(reformation)현상 및 압력 변동이 극심해진다는 실험결과(한국 가스공사, 2010)와 같은 현상으로 인한 것으로 사료되며 목표압력 4 MPa 까지 감압방법은 바람직한 방법이 아닌 것으로 판단된다.

Table 4.15 Summary of results

[unit: m]

	1week	2weeks	3weeks	1month	remarks
Max. subsidence	0.159	0.27	0.39	0.67	D_y1
range of dissociation	2.67	5.32	8	14.63	horizontal direction

③ 공저압 변화에 따른 지반 역학적 거동 분석

Fig. 4.34는 연구대상 후보지 물성인 초기 GH 포화도(0.5), 공극률(0.67), 등은 고정하고 최종 목표압력 4 MPa(Black), 7 MPa(red), 10 MPa(blue)로 감압 시 시간에 따른 침하량을 나타낸 그래프이다.

ΔP 가 클수록 침하량이 증가하는 경향성을 뚜렷이 확인 할 수 있으며 목표압력이 10 MPa인 경우에는 지반침하가 일정하게 발생하는 반면 목표 감압 7 MPa이하인 경우 21일 후부터 침하량이 늘어나는 것을 볼 수 있는데 이는 아래 Fig. 4.35와 같이 ΔP 가 큰 경우 압력변동(fluctuation)으로 압력 교란이 발생되면서 생기는 현상으로 판단되며 목표 감압을 7 MPa이하로 설정한 경우 20일 이후에 지반침하로 인한 대책을 강구하는 것이 바람직하다.

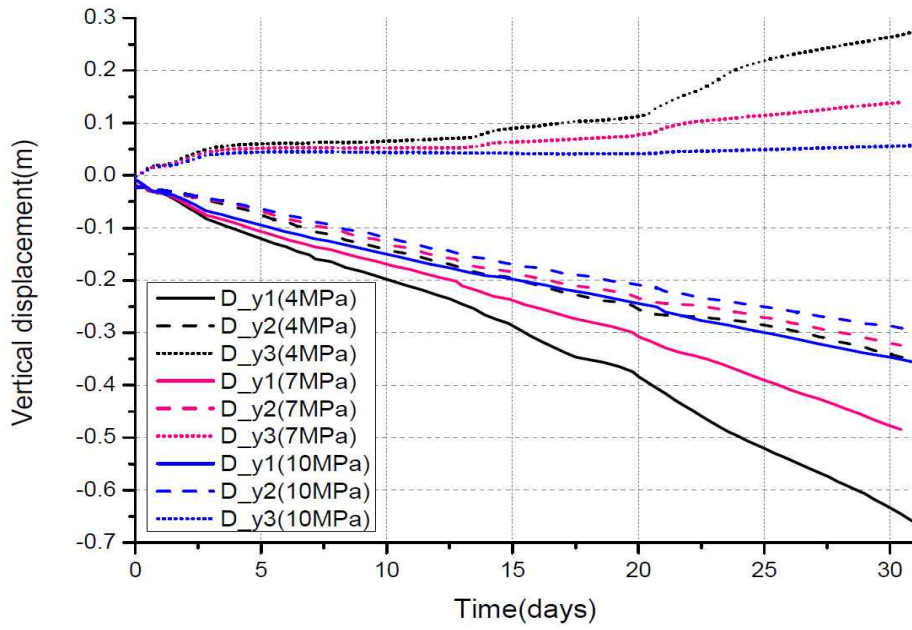


Fig. 4.34 Vertical displacement according to target pore pressures

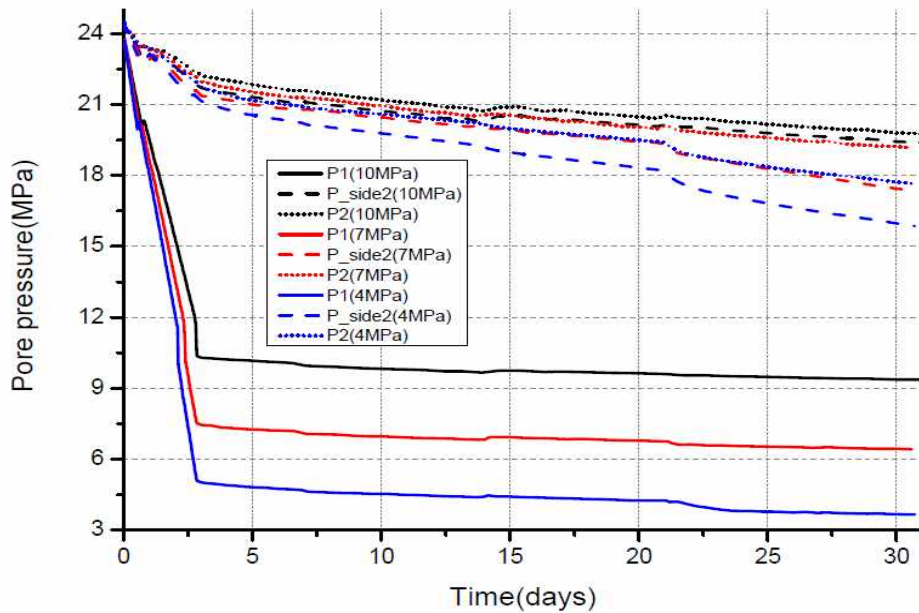


Fig. 4.35 Pore pressure vs. time according to target pressure

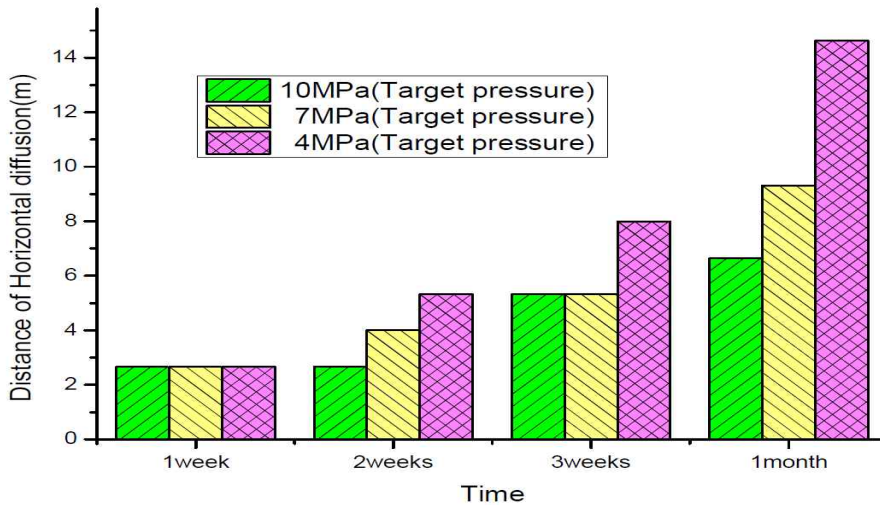


Fig. 4.36 Horizontal range of dissociation according to target pore pressure

Fig 4.36는 공저압 변화에 따른 수평해리 전파 범위를 그래프로 표시한 것으로서 1주간에는 공저압에 관계없이 해리전파가 동일하게 전달되나 2주째부터는 공저압에 따라 해리전파 범위에 더 확장되고 1달째에는 공저압이 4 MPa일 때와 7 MPa 이하일 때의 전파범위의 급격한 차이를 볼 수 있다.

이는 초기 감압 시 특히 감압시작 후 3일까지는 ΔP 가 최소 13 MPa 이상이므로 해리 전파가 많이 발생하므로 해리전파속도가 동일한 것으로 생각되며 공저압이 4 MPa일 때 1달째 해리 전파도가 급격히 상승한 이유는 기 설명한 바대로 20일 후부터 기설명한 바대로 ΔP 가 상대적으로 크므로 압력변동(fluctuation)으로 압력 교란이 발생되면서 생기는 현상으로 판단된다.

(2) 공극률에 따른 지반 역학적 거동해석

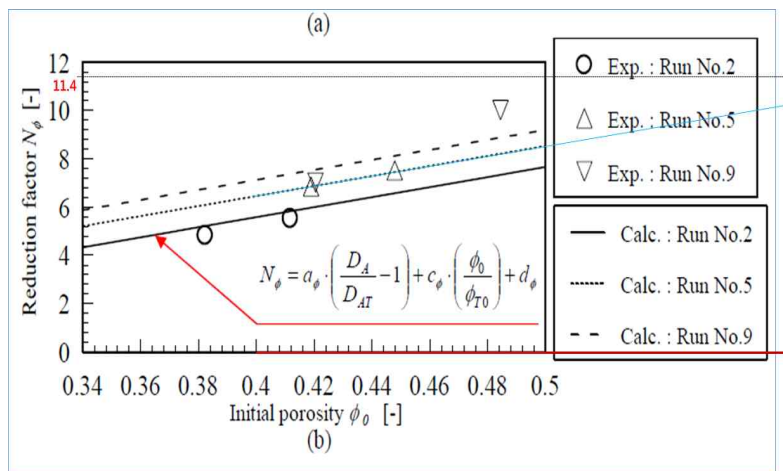
공극률은 GH해리에 가장 중요한 파라미터중 하나로서 공극률 변화

에 따른 지반 역학적 거동변화에 대하여 살펴보고자 한다. 동해 울릉분지 2차 시추지역 물리검층 및 코어분석자료(신효진 등., 2012)에는 이지역의 공극률 분포도가 63.96%~71.35%가 분포되어 있다고 조사된 바 있다.

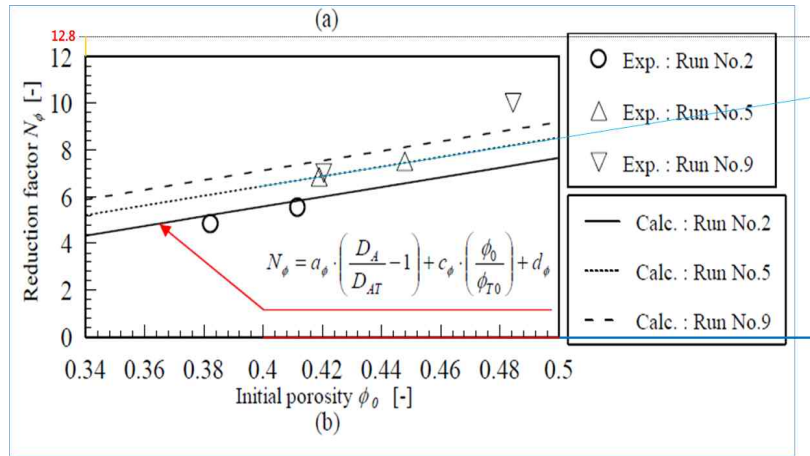
이에 따라 본 논문에서는 GHS층에 최저 공극률인 64%와 71%를 각각 적용하기로 한다. 그 전에 공극률 변화에 의한 투수율 변화를 아래와 같이 계산한다. 다만 목표 감압은 시험생산에서 가장 유력한 목표감압인 7 MPa를 기준으로 한다.

우선, 초기 공극률 0.64인 경우 해리후 공극률을 구하려면 최종공극률 (ϕ_{fin}) = 초기공극률(ϕ_{ini}) - 체적변형률(ϵ_v)(지식경제부, 2012)에서, 체적변형률은 UBGH-X구역 150 mbsf 위치의 압축률(Cc: 1.154)와 수직유효응력 (2.38 MPa)과 공극률을 통한 간극비(1.78), 그리고 초기공극수압(23.7 MPa)에서 평형압력(20 MPa)까지의 Δp (3.7 MPa)을 입력하여 최종 공극률(ϕ_{fin})을 산출하면 $\phi_{fin} = 0.471$ 이 된다.

투수율을 구하기 위해서는 감소인자를 알아보면 Fig. 4.37의 세 개의 선 중 울릉분지 입자분포가 가장 유사한 silica sand#8의 초기 공극률이 0.64일 때 감소인자(N_ϕ)가 Fig. 4.37(a)와 같이 11.4로 유추 가능하다.



(a) Reduction factor 11.4 at initial porosity 0.64



(b) Reduction factor 12.8 at initial porosity 0.71

Fig. 4.37 Formulation of reduction factor with respect to porosity (sakamoto et al., 2008)

공극률 0.64일때 초기/최종 공극률, 감소 인자를 통하여 해리전 투수율 (Sh=0.5) $3.4\text{e-}7\text{m/s}$ 에서 해리 후 투수율(Sh=0)을 계산하면 $5.28\text{e-}8\text{m/s}$ 가 된다.

이와 동일한 방법으로 초기 공극률 0.71일때의 해리 후 공극률과 감소인자 값, 최종 투수율 구하면 다음과 같다.

Table 4.16 porosity and permeability before and after dissociation

properties	before dissociation (Sh=0.5)	after dissociation (Sh=0)	remarks
porosity	0.64	0.471	
permeability	$3.44\text{e-}7\text{m/s}$	$5.28\text{e-}8\text{m/s}$	
reduction fator	11.4		

properties	before dissociation (Sh=0.5)	after dissociation (Sh=0)	remarks
porosity	0.71	0.574	
permeability	$3.44\text{e-}7\text{m/s}$	$1.143\text{e-}7\text{m/s}$	
reduction fator	12.8		

① 초기 공극률 0.64인 경우 Parametric study

가. 초기 주요 조건

Table 4.17 Primary initial Conditions

	내 용	비 고
감압방법	저속감압(약 0.24 MPa/hr)	3일간 23.7→7 MPa
생산정 천공부 높이	10m	생산정 직경 0.1m
수치해석모사 기간	31일	최대 예상시험생산기간

조건	Sh(GH포화도)	공극률	투수율	비고
초기조건	0.5	0.64	3.44e-7m/s	해리전
최종조건	0	0.471	5.28e-8m/s	해리후

나. 수치해석결과

✓ 수직침하 contour

Fig. 4.38는 연구대상 후보지(UBGH-X)의 물성 및 목표 공극압력 7 MPa(약 0.24 MPa/hr)를 고정한 상태로 공극률만을 0.64로 바꾸어 해석하였을 때의 수직변위를 나타내는 contour이다. 지반 거동 양상은 본문 4.2.1(3) 연구대상 후보지 해저지반 역학적 거동 일 때의 패턴과 유사하지만, 최종 수직변위인 0.48 m에 비하여 적은 양(0.33 m)이 침하되었음을 볼 수 있다.

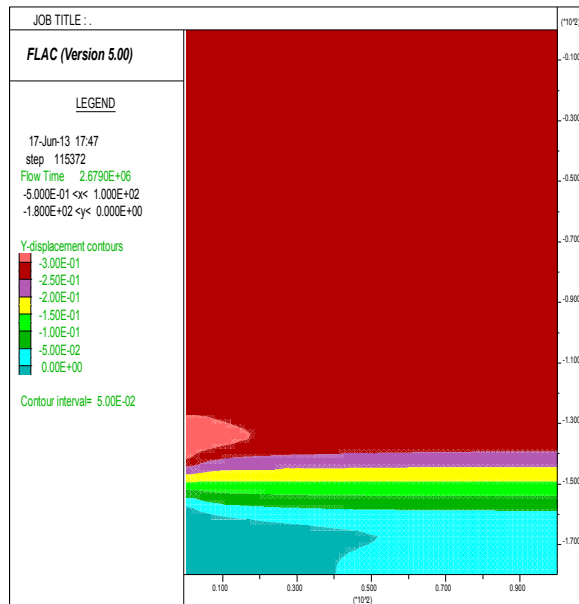
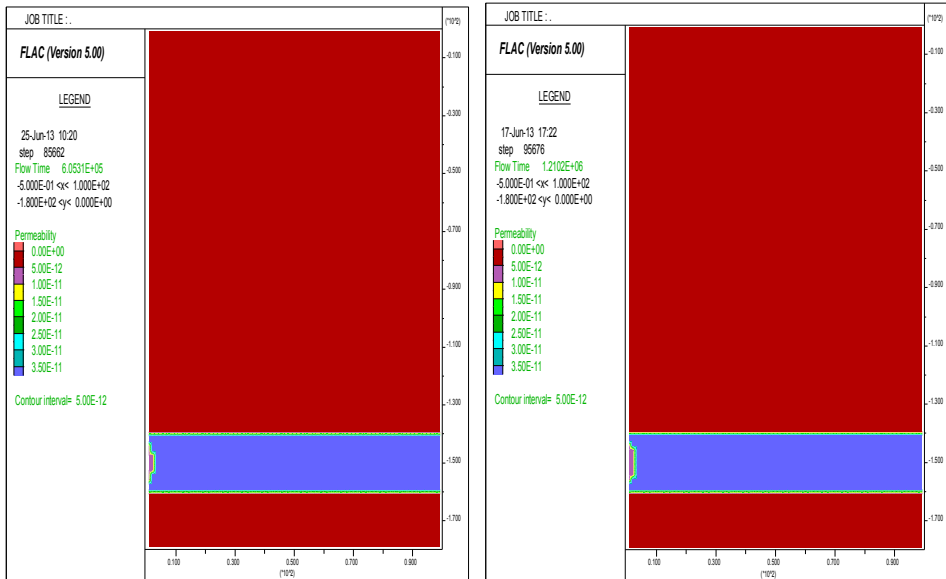


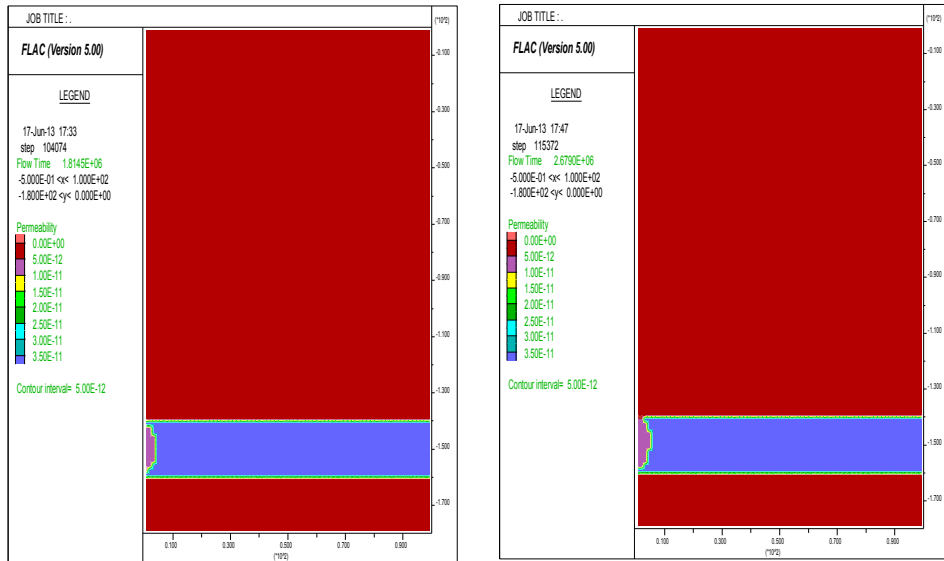
Fig. 4.38 Vertical displacement at depressurization to 4 MPa (1 month)

✓ 해리전파(투수율 변화) contour

Fig. 4.39와 같이 해리 전파영역을 살펴본 바, 처음 1주는 해리전파가 2.67 m, 2주는 2.67 m로 해리수평거리가 동일하지만 1주에 비해서 2주의 해리 면적이 더 넓은 것을 볼 수 있고, 3주는 4 m, 4주는 5.3 m로 지반 거동 양상은 4.2.1(3) 연구대상 후보지(공극률 0.67)에 비하여 절반 정도의 해리전파가 된 것을 볼 수 있다. 이는 연구대상 후보지(공극률 0.67)에 비하여 공극률의 차이가 0.03에 불과하지만 이 공극률의 차이로 인해 해리후 투수율이 약 30%가 적어짐에 따라 해리 전파범위가 절반가량 줄어든 것이며 이에 따라 침하량도 아래 설명과 같이 줄어든 것을 볼 수 있다.



(a) 1st week: horizontal dissociation up to 2.67m (b) 2nd week: horizontal dissociation up to 2.67m



(c) 3rd week: horizontal dissociation up to 4m (d) 1st week: horizontal dissociation up to 5.3m

Fig. 4.39 Permeability change (range of diffusing dissociation)

Fig. 4.15와 같이 GH 생산부 인접 지점(P1), 4m이격된 P_side1/P_side2, 8m 이격된 지점에서의 압력 추이를 아래 Fig. 4.40과 같이 살펴본다.

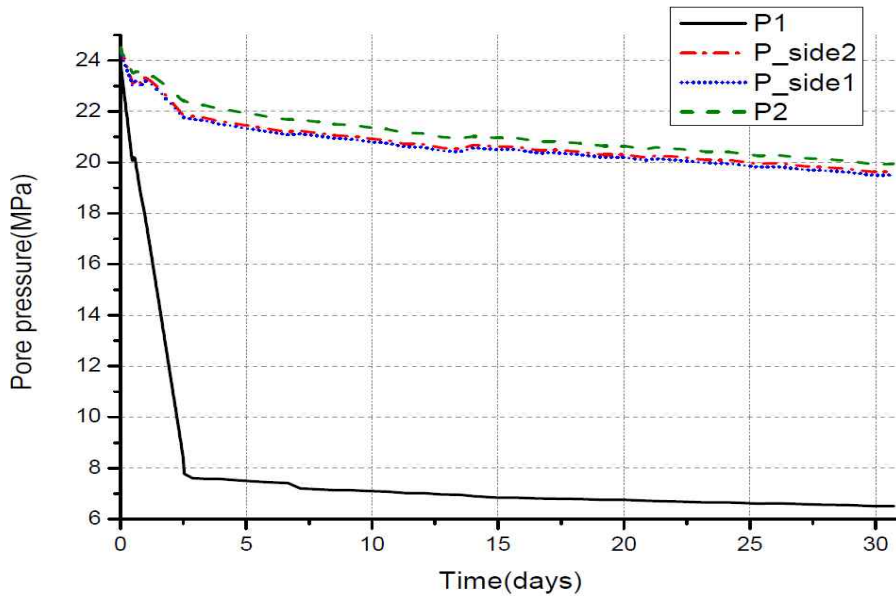


Fig. 4.40 Pore pressure vs. time (1 month)

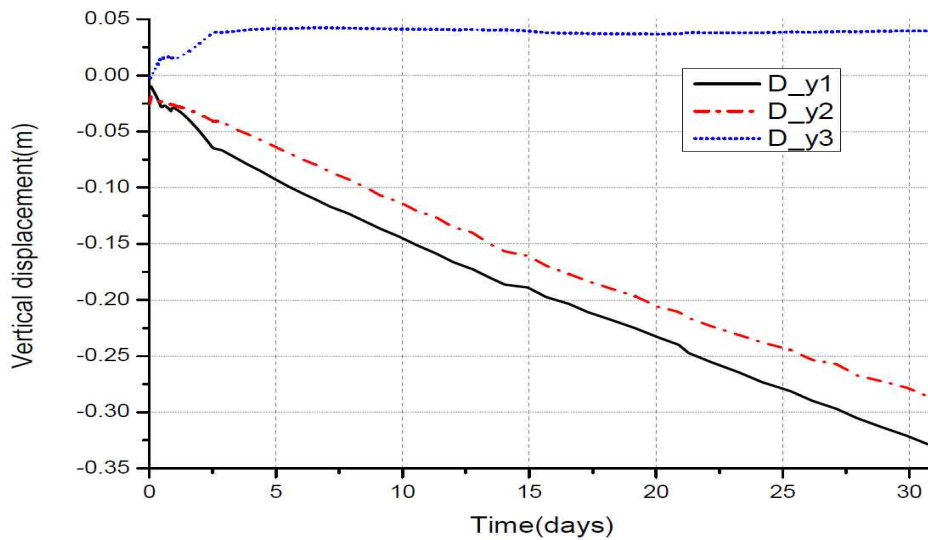


Fig. 4.41 Vertical displacement vs. time (1 month)

Fig. 4.40에서와 같이, 4.2.1(3) 연구대상 후보지(공극률 0.67)의 해리후 투수율에 비해 공극률 0.64의 해리 후 투수율이 약 30%가 적어짐에 따라 P_side1, P_side2 및 P2의 공극압력 변화가 비교적 일정한 것으로 판단된다.

Fig. 4.41은 최대 침하부위인 GHS 직 상부 D_y1와 최 상부 D_y2와 GHS 직 하부 D_y3의 관찰부위에 대한 시간 대 수직침하 그래프로서, 4.2.1(3) 연구대상 후보지(공극률 0.67, 목표감압 7 MPa)의 최종 수직변위인 0.48 m에 비하여 적은 양(0.33 m)이 침하되었으며 이는 연구대상 후보지(공극률 0.67)에 비하여 공극률의 차이가 0.03에 불과하지만 이 공극률의 차이로 인하여 해리 후 투수율이 약 30%가 적어짐에 따라 해리 전파범위가 절반가량 적어지고 이에 따라 침하량도 줄어든 것으로 판단된다.

Table 4.18 Summary of results(porosity: 0.64)

[unit: m]

	1week	2weeks	3weeks	1month	remarks
Max. subsidence	0.117	0.186	0.245	0.329	D_y1
range of dissociation	2.67	2.67	4	5.3	horizontal direction

② 초기 공극률 0.71인 경우 Parametric study

가. 주요 초기조건

Table 4.19 Primary initial Conditions

	내 용	비 고
감압방법	저속감압(약 0.24 MPa/hr)	3일간 23.7→7 MPa
생산정 천공부 높이	10 m	생산정 직경 0.1 m
수치해석모사 기간	31일	최대 예상시험생산기간

조건	Sh(GH포화도)	공극률	투수율	비고
초기조건	0.5	0.71	3.44e-7 m/s	해리전
최종조건	0	0.574	1.143e-7 m/s	해리후

나. 수치해석결과

✓ 수직침하 contour

Fig. 4.42는 연구대상 후보지의 물성 및 목표 공극압력(7 MPa)에서 공극률만 0.71로 변경하여 해석한 수직변위를 나타내는 contour이다.

4.2.1(3) 연구대상 후보지(공극률 0.67, 목표 감압 7 MPa)의 최대 수직 변위인 0.48 m에 비하여 약 2배에 이르는 0.815 m가 침하되었으며 이는 연구대상 후보지(공극률 0.67)에 비하여 공극률의 차이가 불과 0.04에 불과하지만 이 공극률의 차이로 인하여 해리 후 투수율이 약 154%가 커짐에 따라 침하량도 늘어난 것이다.

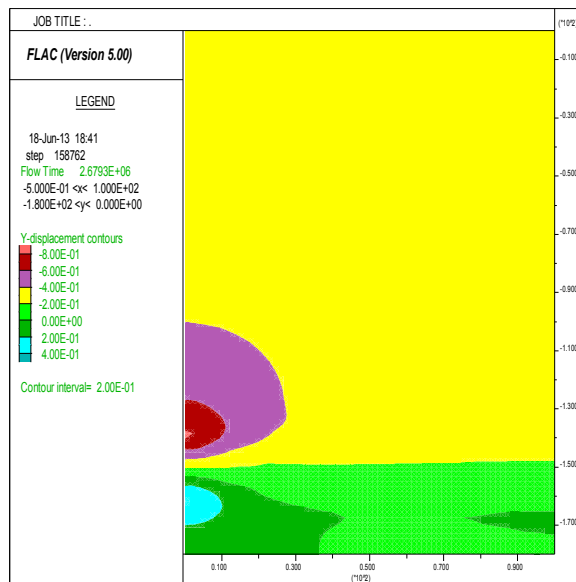
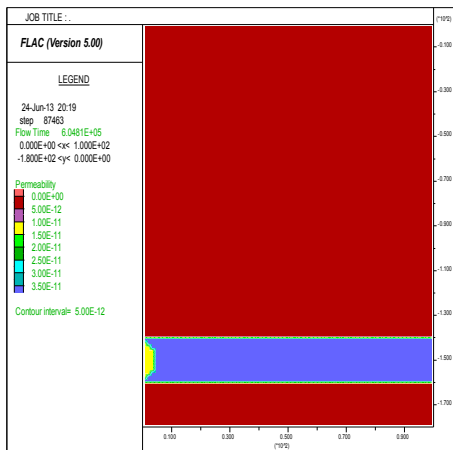


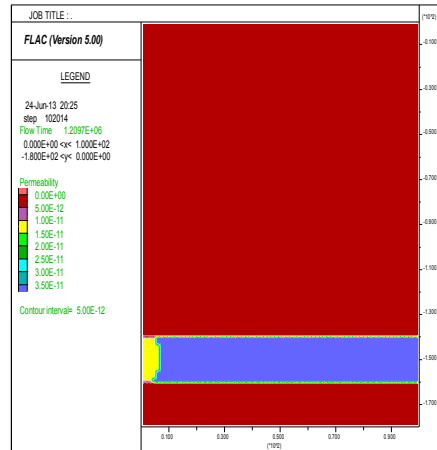
Fig. 4.42 Vertical displacement (1 month)

✓ 해리전파(투수율 변화) contour

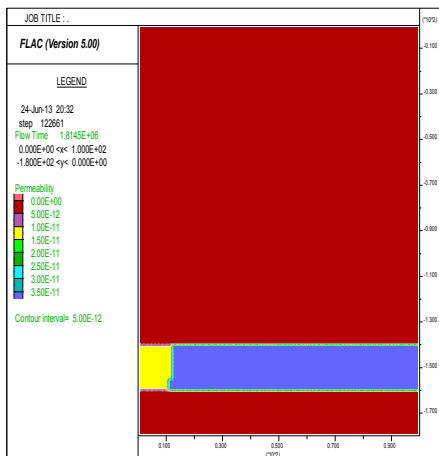
Fig. 4.43와 같이 해리 전파영역을 살펴본 바, 처음 1주는 해리전파가 4 m, 2주는 6.65 m, 3주는 12 m, 4주는 무려 24 m로 지반 거동 양상은 4.2.1(3) 연구대상 후보지(공극률 0.67)에 비하여 2배정도의 해리전파가 된 것을 볼 수 있다.



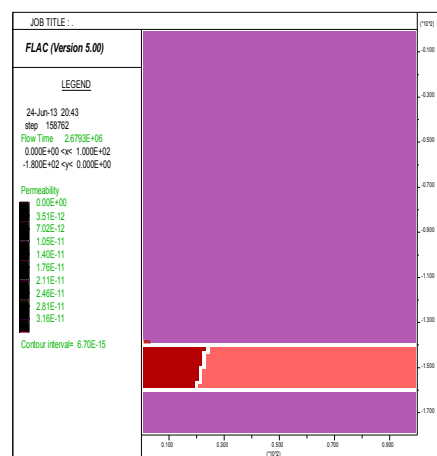
(a) 1st week: horizontal dissociation up to 4m



(b) 2nd week: horizontal dissociation up to 6.65m



(c) 3rd week: horizontal dissociation up to 12m



(d) 1month: horizontal dissociation up to 24m

Fig. 4.43 Permeability change (range of diffusing dissociation)

이는 연구대상 후보지(공극률 0.67)에 비하여 공극률의 차이가 0.04에 불과하지만 이 공극률의 차이로 인하여 해리후 투수율이 154%가 커짐에 따라 해리 전과범위가 두 배 이상 늘어난 것이며 이에 따라 침하량도 아래 설명과 같이 훨씬 많아진 것을 볼 수 있다.

특히, Fig. 4.43(d)에서 보는 바와 같이 해리영역이 상부(140 mbsf에서 1.3 m)까지 확장되는 것을 볼 수 있는데 이는 해리가 되면서 투수율이 증가하여 감압영역이 확대되면서 GH층에 비해 약 5000배 [$3.44\text{e-}7/6.7\text{e-}11(\text{m/s})$] 이상 투수율이 작은 clay층까지 해리되기 시작하는 것임을 알 수 있다.

Fig. 4.15와 같이 GH 생산부 인접 지점(P1), 4 m이격된 P_side1, 8 m이격된 지점(P2)에서의 압력 추이를 아래 Fig. 4.44와 같이 살펴본다. 지금까지 분석한 모든 Case와 달리 해리 후 투수율이 해리 전 보다 오히려 커져서 그 만큼 감압전파가 빠르므로 P_side1,2 및 P1의 변동 폭이 다소 큰 것으로 판단된다.

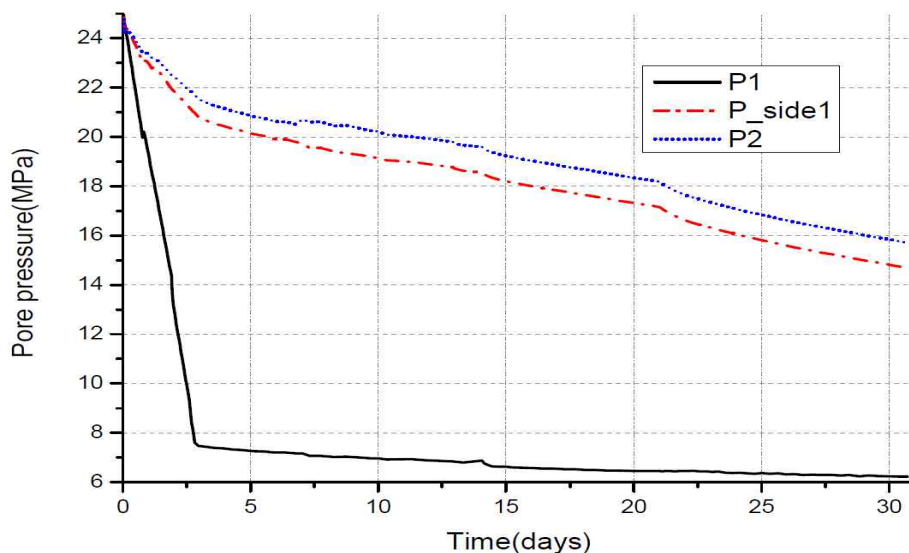


Fig. 4.44 Pore pressure vs. time (1 month)

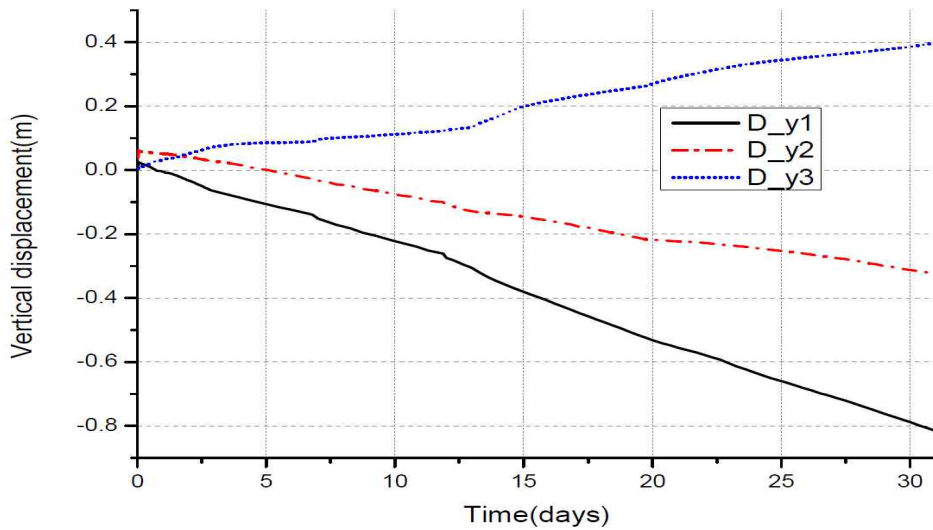


Fig. 4.45 Vertical displacement vs. time (1 month)

Fig. 4.45은 최대 침하부위인 GHS 직 상부 D_y1와 최 상부 D_y2와 GHS 직 하부 D_y3의 관찰부위에 대한 시간 대 수직침하 그래프로서, 4.2.1(3) 연구대상 후보지(공극률 0.67, 목표감압 7 MPa)의 최종 수직변위인 0.48 m에 비하여 약 2배에 이르는 0.815 m가 침하되었으며 이 또한 연구대상 후보지(공극률 0.67)에 비하여 공극률의 차이가 불과 0.04에 불과하지만 이 공극률의 차이로 인하여 해리 후 투수율이 약 154%가 커짐에 따라 해리 전파범위가 2배 만큼 커지고 이에 따라 침하량도 늘어난 것으로 판단된다.

특히, 공극률 0.71인 경우에만 GHS 직 상부(D_y1) 수직 변위가 초기에 상승하였다가 다시 침하하는 것을 볼 수 있는데 이는 공극률이 커서 공극내 공극수가 많이 차있어서 초기 감압 시 공극수 suction으로 인한 변동(fluctuation)이 발생하였다가 다시 안정화되는 수순으로 보인다.

Table 4.20 Summary of results (porosity: 0.71)

[unit: m]

	1week	2weeks	3weeks	1month	remarks
Max. subsidence	0.152	0.305	0.524	0.812	D_y1
range of dissociation	4	6.65	12	24	horizontal direction

③ 공극률 변화에 따른 지반 역학적 거동 분석

Fig. 4.46는 연구대상 후보지 물성 및 최종 목표압력을 7 MPa로 고정하고, 공극률을 각각 0.64(black), 0.67(red), 0.71(blue)로 각각 case별로 해석하였을 때 감압 시 시간에 따른 침하량을 나타낸 그래프이다.

공극률이 클수록 침하량이 증가하는 경향성을 뚜렷이 확인 할 수 있다. 이는 해리 후 투수율이 공극률 증가에 비례하여 상승하므로 해리 후 투수율이 커짐에 따라 공극압력 감압전이가 빨라지고 해리전파 영역이 넓어져 많은 구역이 해리되므로 그 만큼 침하량이 늘어나기 때문이다.

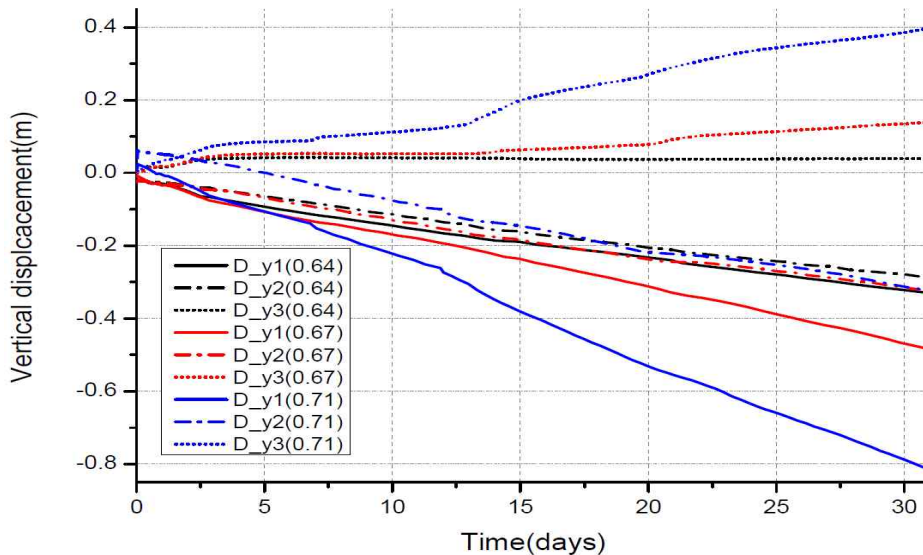


Fig. 4.46 Vertical displacement according to porosity

그리고 GHS 직 상부 지역(Dy_1)의 지반침하하는 공극률의 차이에 따라 침하량의 많은 차이를 보이지만 해저면(Dy_2)에서는 침하량의 차이가 거의 없는 것을 볼 수 있다.

다만, 공극률이 0.71인 경우에만 GHS 직 상부(Dy_1)가 초기에 상승했다가 다시 침하하는 것을 볼 수 있는데, 이는 공극률이 커서 공극내 공극수가 많아서 감압으로 물을 suction하는 과정에서의 변동(fluctuation) 때문으로 생각된다.

Fig. 4.47와 같이 공극률이 0.67, 0.71의 경우가 0.64인 경우에 비하여 해리 후 투수율차이의 영향으로 인해 P_side2 및 P2의 압력 변동이 큰 것을 볼 수 있다. 이로 인해 2주 이후부터는 해리전파범위 및 침하율이 커지는 것으로 연관 지을 수 있다.

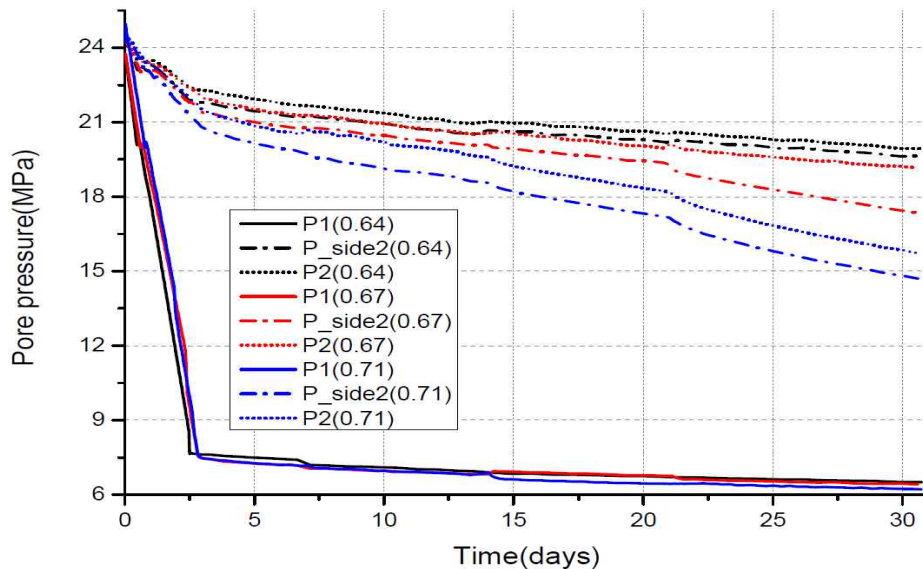


Fig. 4.47 Pore pressure vs. time according to different porosity

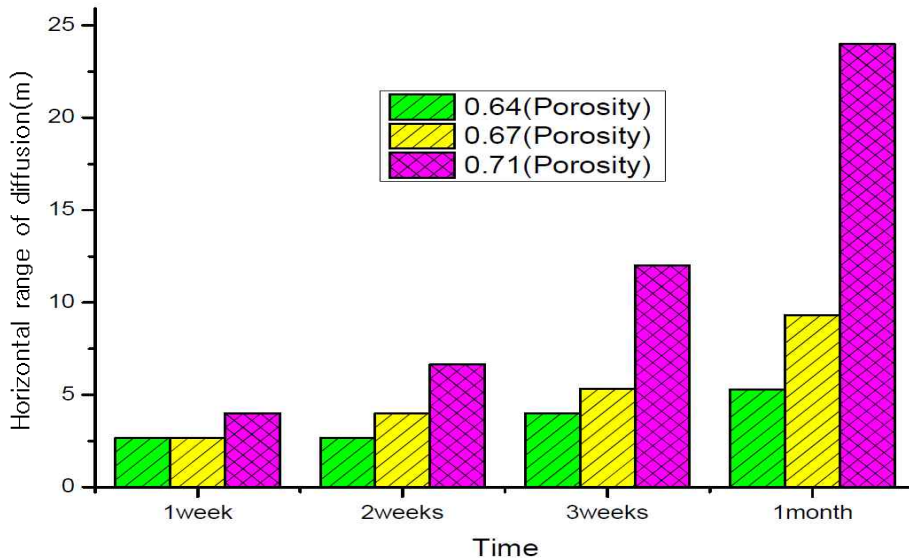


Fig. 4.48 Horizontal range of diffusion according to target pore pressure

Fig. 4.48은 공극률 변화에 따른 수평해리 전파 범위를 그래프로 표시한 것으로서 1주 내지 2주간 공극률에 관계없이 해리전파가 비교적 유사하게 전달되지만 3주째부터는 공극률이 큰 경우 해리전파범위가 확장되고 1달째에는 0.64 및 0.67 보다 0.71의 전파범위의 급격한 차이를 볼 수 있다. 공극률이 0.71일 때 1달째 해리 전파도가 급격히 상승한 이유는 공극률이 비교적 크므로 해리후 투수율 또한 크므로 초기에는 해리전파가 진행되지 않다가 20일 정도 경과 후에 상기 Fig. 4.47 공극압력 변화 그래프와 같이 압력교란이 발생하면서 해리가 급격하게 진행되는 것으로 판단된다.

(3) 투수율에 따른 지반역학적 거동해석

① 초기 투수율 1.5K인 경우 Parametric study

가. 초기 주요 조건

Table 4.21 Primary initial Conditions

	내 용	비 고
감압방법	저속감압(약 0.24 MPa/hr)	3일간 23.7→7 MPa
생산정 천공부 높이	10 m	생산정 직경 0.1 m
수치해석모사 기간	31일	최대예정시험생산기간

조건	Sh(GH포화도)	공극률	투수율	비고
초기조건	0.5	0.67	5.15e-7 m/s (1.5K)	K=3.44e-7
최종조건	0	0.551	7.424e-8 m/s	-

나. 수치해석결과

✓ 수직침하 contour

Fig. 4.49는 연구대상 후보지(UBGH-X) 물성 및 목표 공극압력(7 MPa)을 고정하고 초기공극률을 연구대상 후보지 투수율에 1.5배의 투수율을 적용하여 해석한 수직변위를 나타내는 contour이다. 연구대상 후보지(투수율 K)의 최종 수직변위인 0.48 m에 비하여 2배가량 (0.85 m)이 침하되었으며 이는 1.5K의 초기공극률의 차이로 인하여 침하가 2배가량 늘어난 것이다

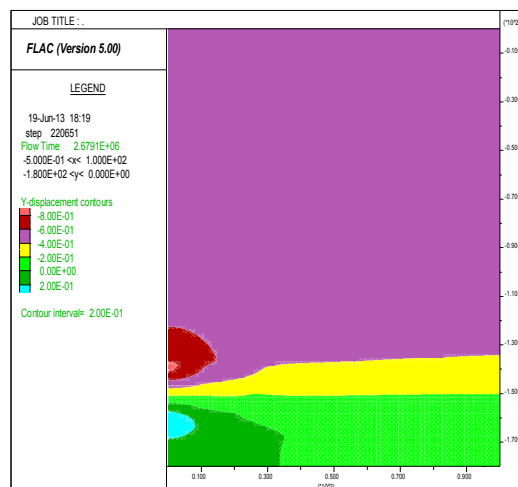
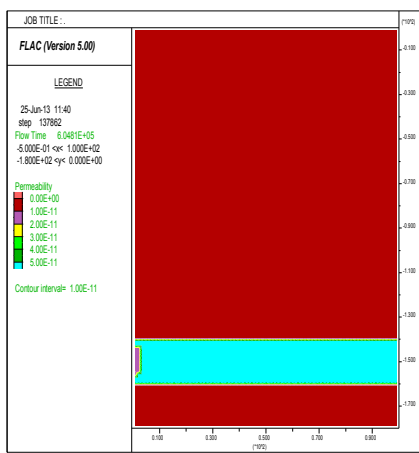


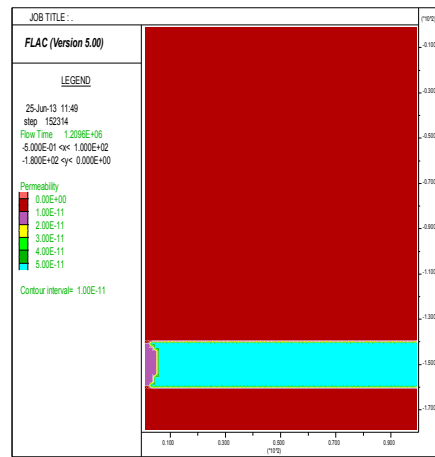
Fig. 4.49 Vertical displacement (1 month)

✓ 해리전파(투수율 변화) contour

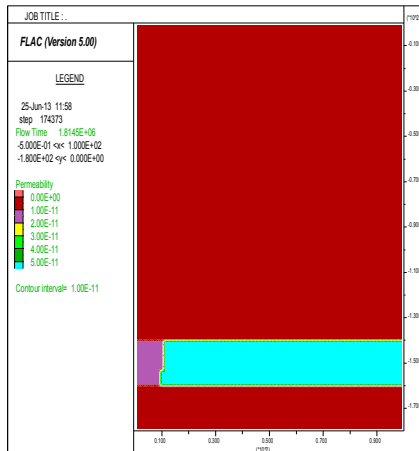
Fig. 4.50과 같이 해리 전파영역을 살펴본 바, 처음 1주는 2.67 m, 2주는 5.32 m 3주는 10.64 m, 4주는 29.26 m로 지반 거동 양상은 4.2.1(3) 연구대상 후보지(투수율 K)에 비하여 두 배 정도의 해리전파가 된 것을 볼 수 있다. 이는 연구대상 후보지(투수율 K)에 비하여 초기투수율이 1.5K이므로 해리전파전이가 빨라짐에 따라 발생하는 현상이라 할 수 있다. 이에 따라 침하량도 아래 설명과 같이 늘어난 것을 볼 수 있다.



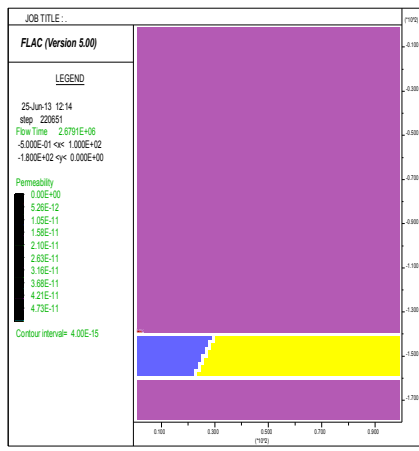
(a) 1st week: horizontal dissociation up to 2.67m



(b) 2nd week: horizontal dissociation up to 5.32m



(c) 3rd week: horizontal dissociation up to 10.64m



(d) 1month: horizontal dissociation up to 29.26m

Fig. 4.50 Permeability change(range of diffusing dissociation)

Fig. 4.15와 같이 GH 생산부 인접 지점(P1), 4m이격된 P_side1/P_side2, 8m 이격된 지점에서의 압력 추이를 아래 Fig. 4.51과 같이 살펴본다.

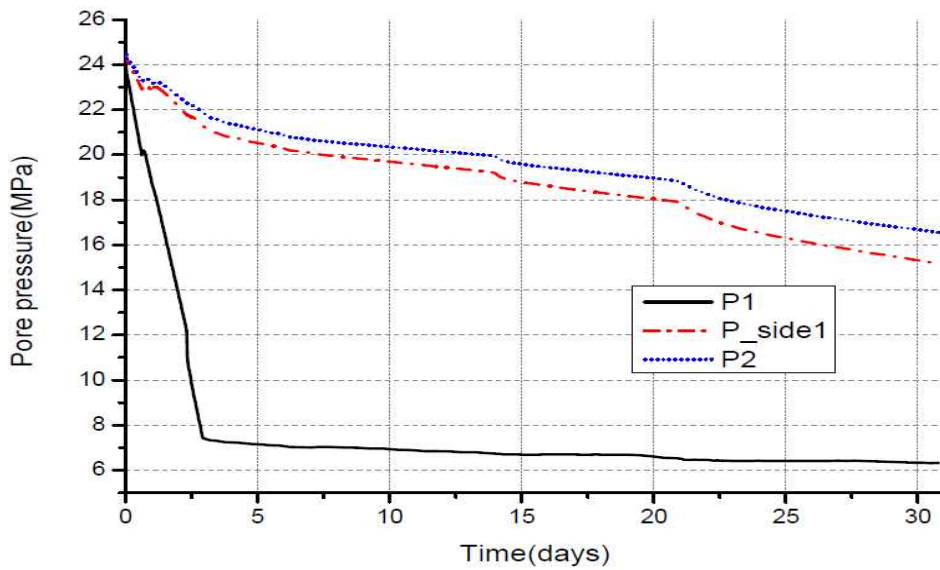


Fig. 4.51 Pore pressure vs. time (1 month)

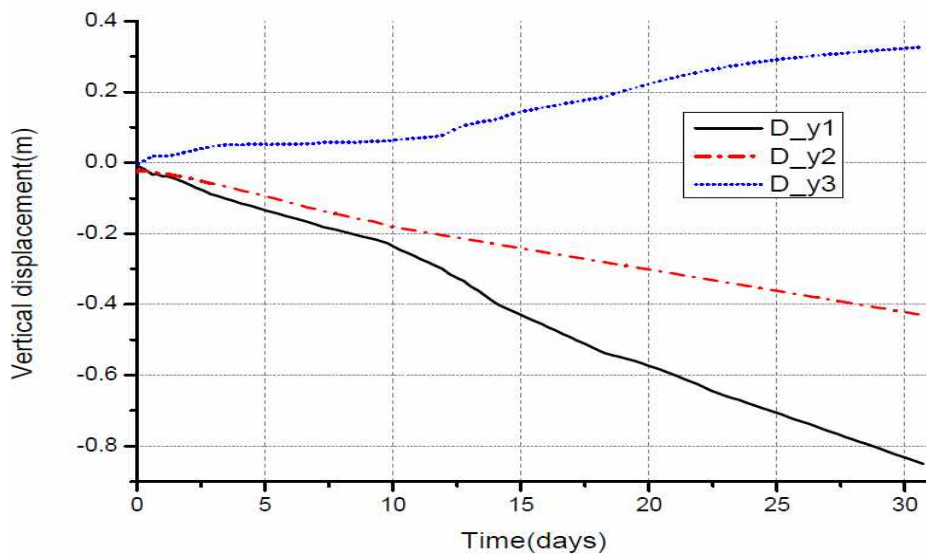


Fig. 4.52 Vertical displacement vs. time (1 month)

Fig. 4.51에서와 같이, 4.2.1(3) 연구대상 후보지(투수율 K)에 비해 초기투수율이 1.5K로서 해리전파에 빨라짐에 따라 P_side1 및 P2의 공극압력 변동이 발생한 것으로 보인다.

Fig. 4.52는 최대 침하부위인 GHS 직상부 D_y1와 최상부 D_y2와 GHS 직하부 D_y3의 관찰부위에 대한 시간 대 수직침하 그래프로서, 4.2.1(3) 연구대상 후보지(투수율 K)의 최종 수직변위인 0.48 m에 비하여 2배가량 (0.85 m)이 침하되었으며 이는 1.5K의 공극률의 차이로 인하여 해리 전파범위 및 침하가 2배가량 늘어난 것이다.

Table 4.22 summary of results for 1.5K [unit: m]

	1week	2weeks	3weeks	1month	remarks
Max. subsidence	0.175	0.314	0.537	0.85	D_y1
range of dissociation	2.67	5.32	10.64	29.26	horizontal direction

② 초기 투수율 0.5K인 경우 parametric study

가. 초기 주요 조건

Table 4.23 Primary initial Conditions

	내 용		비 고	
감압방법	저속감압(약 0.24 MPa/hr)		3일간 23.7→7 MPa	
생산정 천공부 높이	10 m		생산정 직경 0.1 m	
수치해석모사 기간	31일		최대예상시험생산기간	

조건	Sh(GH포화도)	공극률	투수율	비고
초기조건	0.5	0.67	1.72e-7 m/s (0.5K)	K=3.44e-7
최종조건	0	0.551	7.424e-8 m/s	-

나. 수치해석결과

✓ 수직침하 contour

Fig. 4.53은 연구대상후보지 물성(투수율K) 및 목표공극수압(7 MPa)을 동일하게 하고 초기투수율 0.5K를 적용 하였을 때의 수직변위를 나타내는 contour이다. 최종 최대침하량이 연구대상후보지 0.48 m에 비해 절반인 0.234 m에 불과하여 해리전 투수율이 침하량에 미치는 영향이 지대하다 할 수 있다.

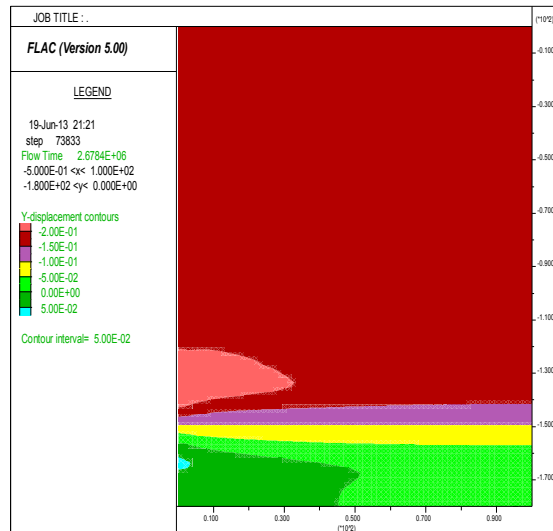
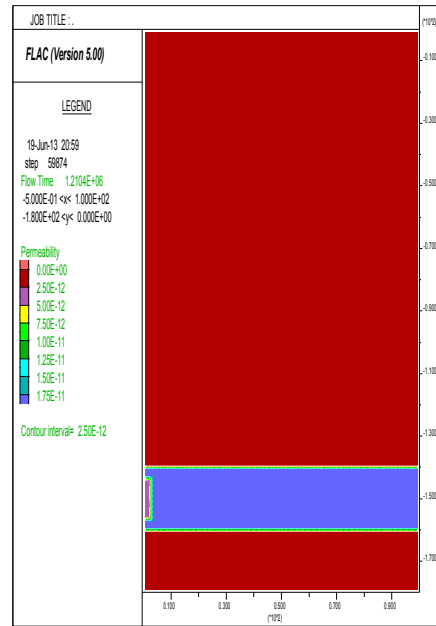
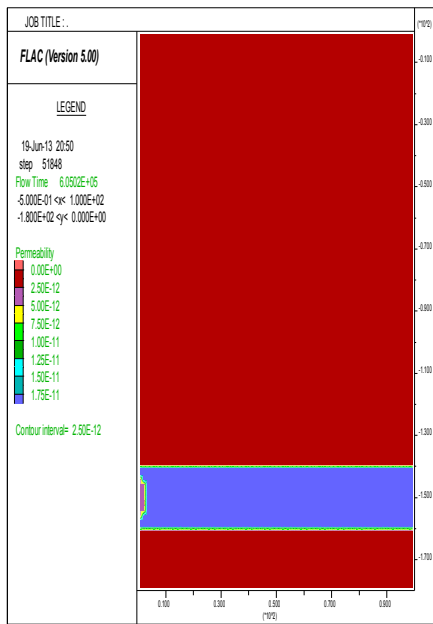


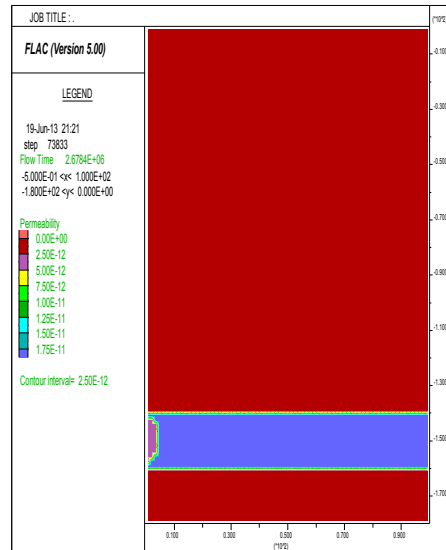
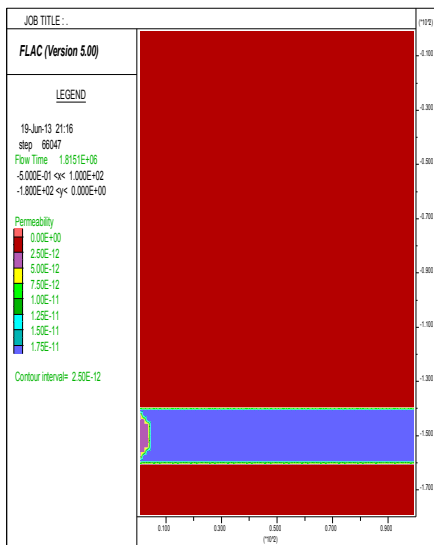
Fig. 4.53 Vertical displacement at depressurization to 7 MPa (1 month)

✓ 해리전파(투수율 변화) contour

Fig. 4.54와 같이 해리 전파영역을 살펴본 바, 처음 1주는 해리전파가 2.66 m, 2주는 2.66 m로 동일하지만 해리 면적이 2주가 1주에 비해 조금 더 넓은 것을 볼 수 있고, 3주는 4 m, 1달은 4 m로 지반 거동 양상은 4.2.1(3) 연구대상 후보지(공극률 0.67)에 비하여 절반정도의 해리전파가 된 것을 볼 수 있다. 이는 연구대상 후보지(공극률 0.67)에 비하여 해리전 투수율이 50%가 적어짐에 따라 해리 전파범위가 절반가량 적어진 것으로 판단되며 이에 따라 침하량도 아래 설명과 같이 줄어든 것을 볼 수 있다.



(a) 1st week: horizontal dissociation up to 267m (b) 2nd week: horizontal dissociation up to 267m



(c) 3rd week: horizontal dissociation up to 4m (d) 1 month: horizontal dissociation up to 4m

Fig. 4.54 Permeability change (range of diffusing dissociation)

Fig. 4.15와 같이 GH 생산부 인접 지점(P1), 4 m이격된 P_side1/P_side2, 8 m 이격된 지점에서의 압력 추이를 아래 Fig. 4.55와 같이 살펴본다. 4.2.1(3) 연구대상 후보지의 투수율에 비해 초기투수율이 50%(0.5K)가 적어 해리가 아주 조금씩 진행되므로 31일 내내 압력 변동이 없이 P_side1, P_side2 및 P2의 공극압력 변화가 비교적 일정한 것을 볼 수 있고 따라서 아래 Fig. 4.56과 같이 시간 대 침하 그래프에서도 급격한 침하 없이 일정하게 침하되는 것을 볼 수 있다.

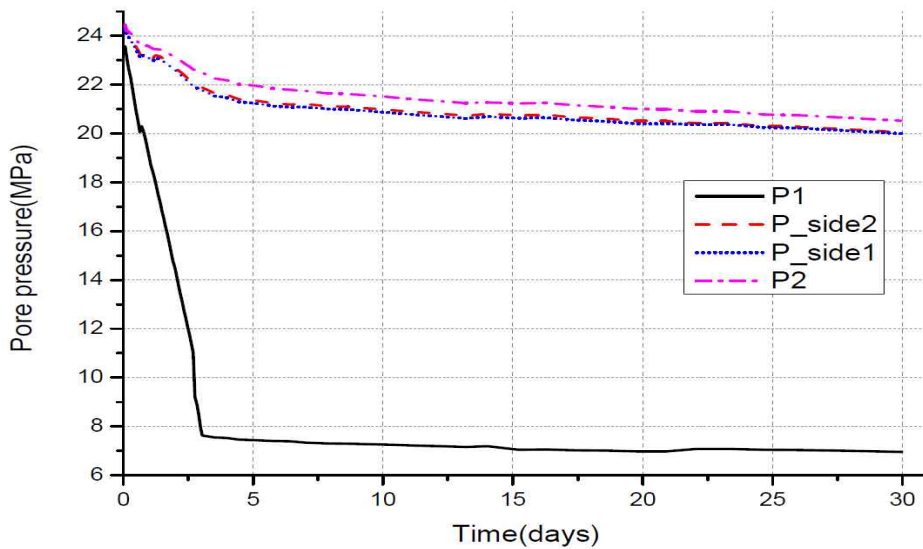


Fig. 4.55 Pore pressure vs. time (1 month)

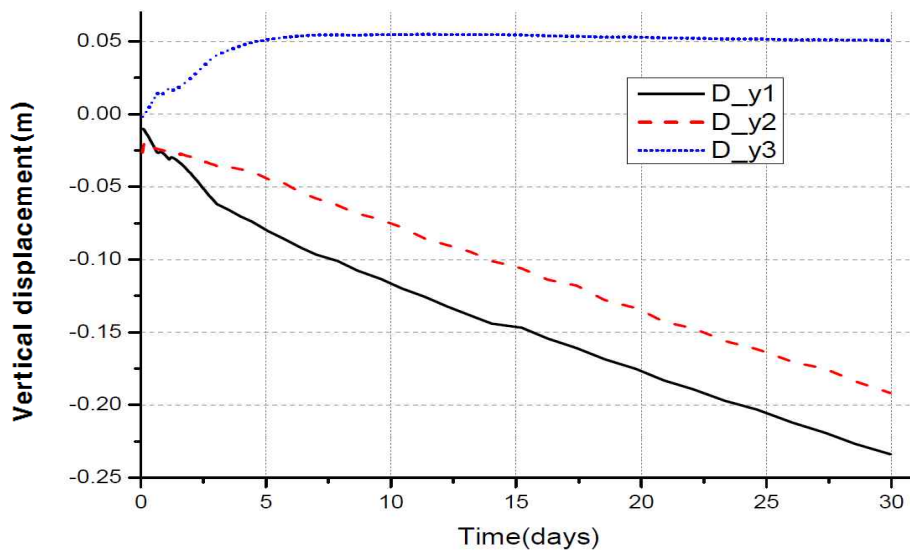


Fig. 4.56 Vertical displacement vs. time (1 month)

Table 4.24 Summary of results(0.5k)

[unit: m]

	1week	2weeks	3weeks	1month	remarks
Max. subsidence	0.1	0.14	0.183	0.234	D_y1
range of dissociation	2.67	2.67	4	4	horizontal direction

③ 투수율 변화에 따른 지반역학적 거동 분석

Fig. 4.57은 연구대상 후보지(UBGH-X) 물성 및 목표공급수압(7 MPa)으로 하고, 투수율을 각각 0.5K(black), K(red), 1.5K(blue)로 각각 case별로 해석하였을 때 감압 시 시간에 따른 침하량을 나타낸 그래프이다.

초기 투수율이 클수록 침하량이 증가하는 경향성을 뚜렷이 확인 할 수 있다. 초기 투수율이 커짐에 따라 공극압력 감압전이가 빨라지고 해리전과 영역이 넓어져 많은 구역이 해리되므로 그 만큼 침하량이 늘어나기 때문이다.

투수율 0.5K에 비해 K 및 1.5K는 10일 후부터 침하량이 늘어나는 현상은 볼 수 있는데 이는 K 및 1.5K는 0.5K에 비해 해리전과 속도가 빨라서 그 만큼 지반 안정성에 악영향을 미치는 것으로 판단된다.

그리고 GHS 직상부 지역(Dy_1)의 지반침하는 투수율의 차이에 따라 침하량의 많은 차이를 보이지만 해저면(Dy_2)에서는 침하량의 차이가 비교적 적은 것을 볼 수 있다.

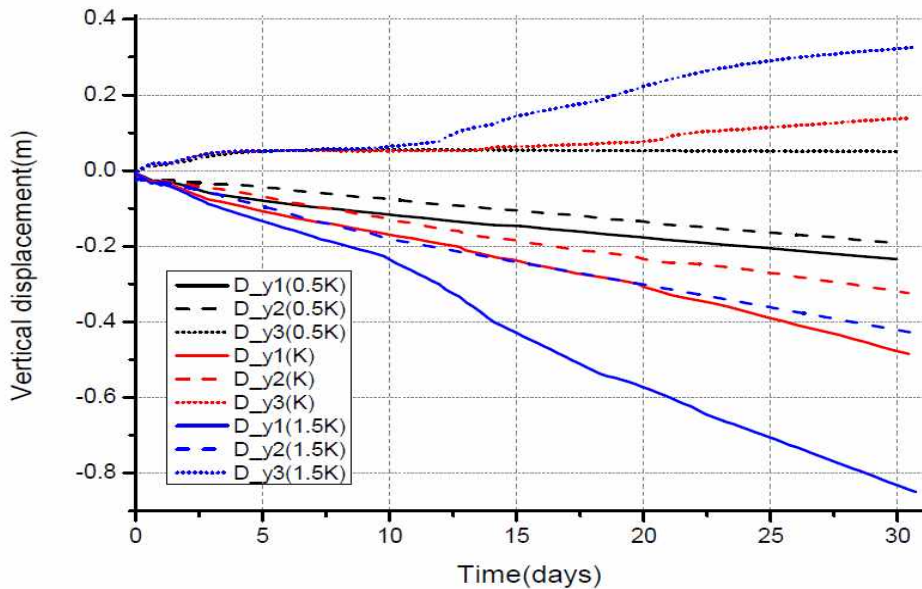


Fig. 4.57 Vertical displacement according to different permeability

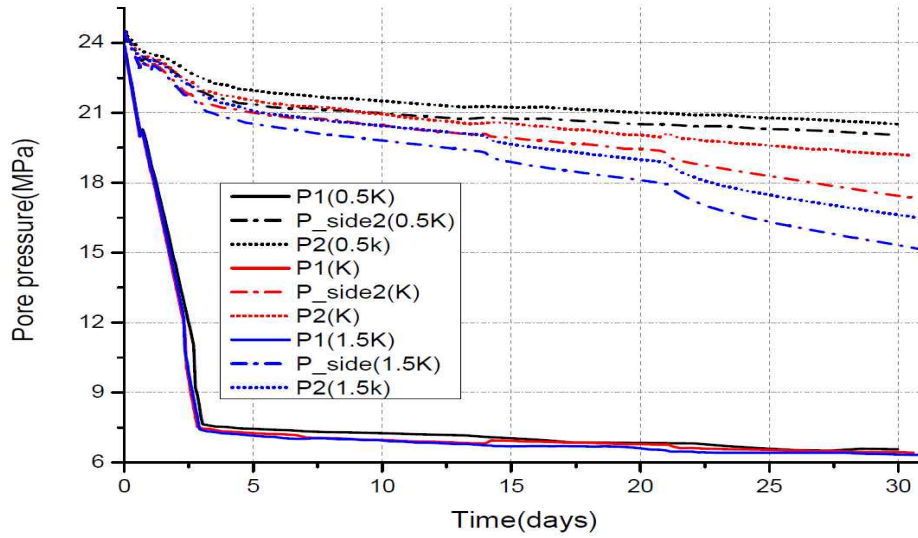


Fig. 4.58 Pore pressure vs. time according to different permeability

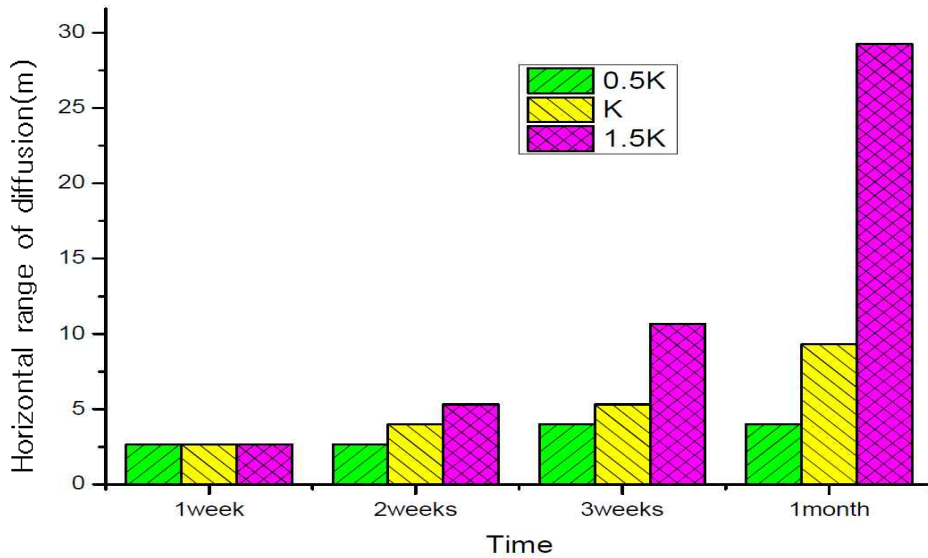


Fig. 4.59 Horizontal range of dissociation according to permeability

Fig. 4.58과 같이 투수율이 K 및 1.5K경우가 0.5K인 경우에 비하여 P_side2 및 P2의 압력 변동이 큰 것을 볼 수 있다. 이로 인해 2주 이후부터는 해리전과범위 및 침하율이 커지는 것으로 연관 지을 수 있다.

Fig. 4.59는 투수율 변화에 따른 수평해리 전파 범위를 그래프로 표시한 것으로서 1주 내지 2주간 초기 투수율에 관계없이 해리전파가 비교적 유사하게 전달되지만 3주째부터는 초기 투수율이 큰 경우 해리전파범위가 확장되고 1달째에는 1.5K와 0.5K, K의 전파범위의 급격한 차이를 볼 수 있다. 초기 투수율이 1.5K일 때 1달째 해리 전파도가 급격히 상승한 이유는 초기 투수율이 비교적 크므로 20일 정도 경과 후에 상기 Fig. 4.67 공극압력 변화 그래프와 같이 압력교란이 발생하면서 해리가 급격하게 진행되는 것으로 판단된다.

(4) 가스하이드레이트 포화도에 따른 지반역학적 거동해석

① 가스하이드레이트 포화도가 60%인 경우 Parametric study

가. 초기 주요 조건

Table 4.25 Primary initial Conditions

	내 용		비 고	
감압방법	저속감압(약 0.24 MPa/hr)		3일간 23.7→7 MPa	
생산정 천공부 높이	10 m		생산정 직경 0.1 m	
수치해석모사 기간	31일		최대예상시험생산기간	

조건	Sh(GH포화도)	공극률	투수율	비고
초기조건	0.6	0.67	9.1e-7 m/s	
최종조건	0	0.551	7.424e-8 m/s	-

나. 수치해석결과

✓ 수직침하 contour

Fig. 4.60는 연구대상 후보지(UBGH-X) 물성 및 목표 공극압력(7 MPa)을 그대로 두고 GH 포화도가 0.6인 경우 초기 물성을 입력하여 해석하였을 때 1달 후의 수직변위를 나타내는 contour이다. 4.2.1(3) 연구대상 후보지($Sh=0.5$)에 비해 포화도가 10% 많은 $Sh=0.6$ 으로서 GHS 직상부의 지반 침하가 연구대상 후보지 0.48 m에 비하여 침하량(0.65 m)이 큰 것을 볼 수 있다. 이는 초기 포화도가 높은 만큼 해리전후 투수율 차이가 크고 초기 포화도가 큰 만큼 해리 전 강성 값(체적/전단 탄성계수 값)이 크므로 해리 전후의 강성 값 차이가 크므로 지반거동에 영향을 많이 미쳐 침하가 많이 발생한 것으로 판단된다.

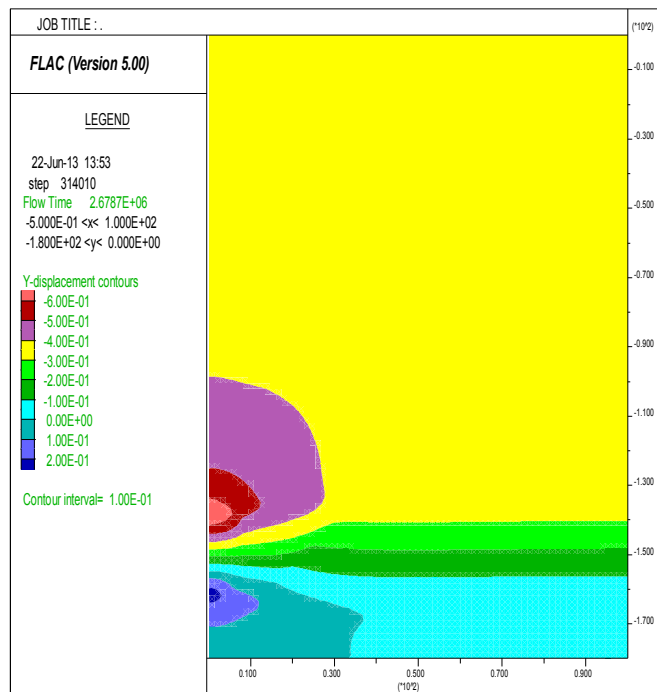
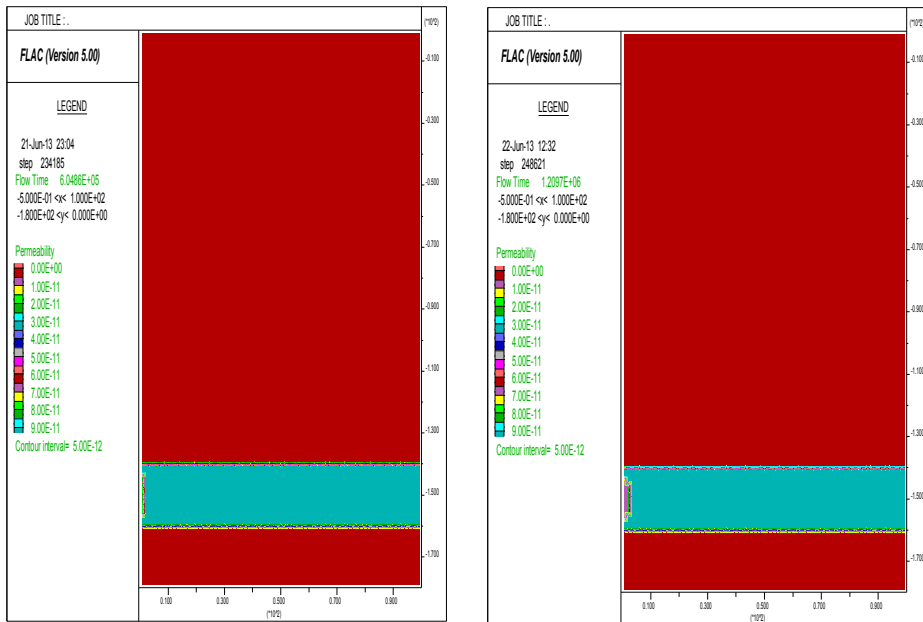


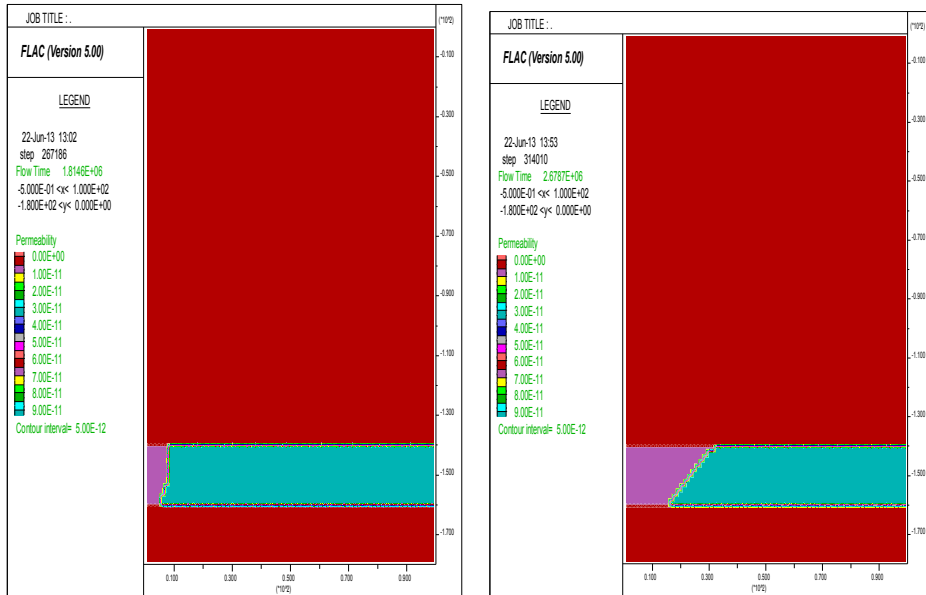
Fig. 4.60 Vertical displacement (1 month)

✓ 해리전과(투수율 변화) contour

Fig. 4.61와 같이 해리 전과영역을 살펴본 바, 처음 1주는 1.33 m, 2주는 2.67 m 3주는 8m, 4주는 31.96 m로 해리 전과도는 1달째 4.2.1(3) 연구대상 후보지($Sh=0.5$)에 비하여 3배 정도의 해리전과가 된 것을 볼 수 있다. 이는 연구대상 후보지($Sh=0.5$)에 비하여 포화도가 10% 많아 해리전후 투수율 차이가 크고 해리전후 GHS 강성차이가 크므로 해리전과가 많이 발생한 것으로 판단된다. 특히, 3주에서 4주 사이에 해리전과가 급하게 발생된 이유는 3주에는 강성이 큰 부분이 총길이의 92%(92 m/100 m)를 차지하여 상부 지층을 지지하고 있지만 해리전후 투수율 차이로 해리가 진행되면서 강성이 큰 부분이 차지하는 비율이 작아지면서 급격하게 상부지지력이 떨어지면서 발생하는 현상으로 사료된다.



(a) 1st week: horizontal dissociation up to 1.33m (b) 2nd week: horizontal dissociation up to 2.67m



(c) 3rd week: horizontal dissociation up to 8m (d) 1month: horizontal dissociation up to 31.92m
Fig. 4.61 Permeability change (range of diffusing dissociation)

Fig. 4.15와 같이 GH 생산부 인접 지점(P1), 4 m이격된 P_side1/P_side2, 8 m 이격된 지점에서의 압력 추이를 아래 Fig. 4.62와 같이 살펴본다. 4.2.1(3) 연구대상 후보지($Sh=0.5$)의 해리전후 투수율 차이에 비해 $Sh=0.6$ 해리전후 투수율 차이에 크므로 P_side1, P_side2 및 P2의 공극압력 변동이 발생한 것으로 보인다.

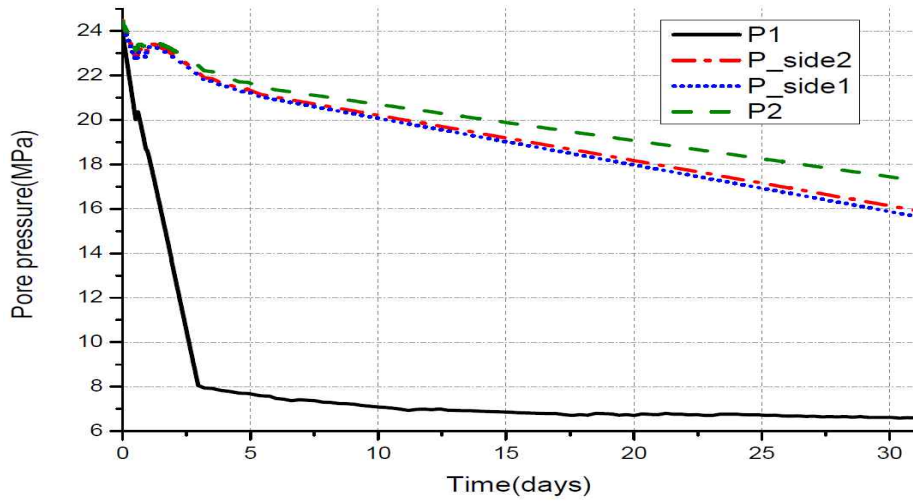


Fig. 4.62 Pore pressure vs. time (1 month)

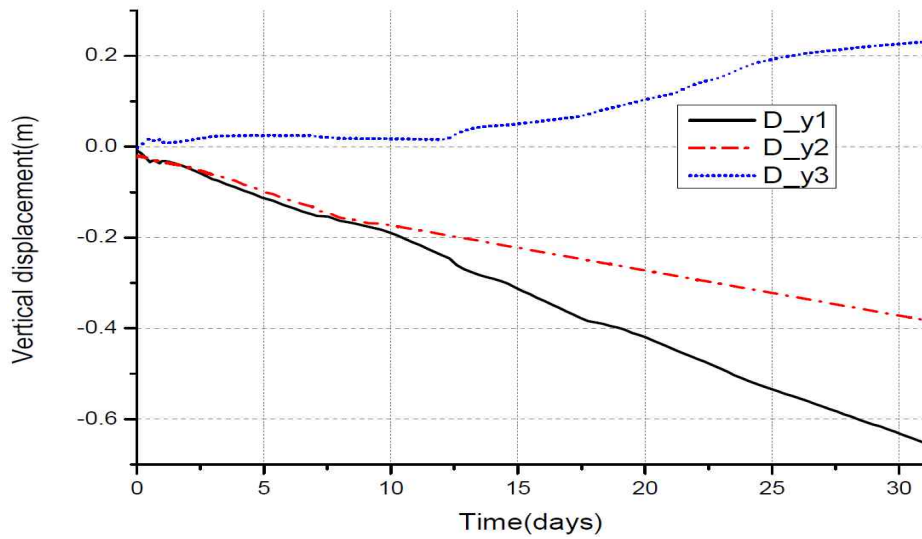


Fig. 4.63 Vertical displacement vs. time (1 month)

Fig. 4.63은 최대 침하부위인 GHS 직상부 D_{y1} 와 최상부 D_{y2} 와 GHS 직하부 D_{y3} 의 관찰부위에 대한 시간 대 수직침하 그래프로서, 연 구대상 후보지($Sh=0.5$)의 최종 수직변위인 0.48 m에 비하여 약 1.35배

(0.65 m)가 침하되었으며 이는 GH포화도에 차이에 따른 해리전후 투수율의 차이로 인해 해리전파가 많이 되고 또한 해리전후 강성 값(탄성계수 및 전단탄성계수, 점착력 값)이 차이가 크므로 지반거동에 영향을 크게 미쳐 지반침하가 많이 발생한 것으로 판단된다.

Table 4.26 summary of result for Sh=0.6

[unit: m]

	1week	2weeks	3weeks	1month	remarks
displacement	0.152	0.246	0.384	0.65	D_y1
range of dissociation	1.33	2.67	8	31.92	horizontal direction

② 가스하이드레이트 포화도가 40%인 경우 Parametric study

가. 초기 주요 조건

Table 4.27 Primary initial Conditions

	내 용	비 고
감압방법	저속감압(약 0.24 MPa/hr)	3일간 23.7→7 MPa
생산정 천공부 높이	10 m	생산정 직경 0.1 m
수치해석모사 기간	31일	-

조건	Sh(GH포화도)	공극률	투수율	비고
초기조건	40%	0.67	2.06e-7 m/s	
최종조건	0	0.551	7.424e-8 m/s	-

나. 수치해석결과

✓ 수직침하 contour

Fig. 4.64는 GH포화도가 40%일 때 목표 공극압력을 7 MPa로 저속감압(약 0.24 MPa/hr) 하였을 때의 수직변위를 나타내는 contour이다. 최대 침하량이 0.496 m로서 GH포화도가 0.5일 때와 거의 동일하지만 해저면(0 mbsf)의 침하량은 0.297 m로서 $Sh=50\%$ (0.324 m)에 비해 10% 침하량이 줄어드는 것으로 볼 때 포화도가 적어지면 해리전후 강성차이 및 투수율 차이가 적으므로 그만큼 이 침하량도 줄어드는 것으로 판단된다.

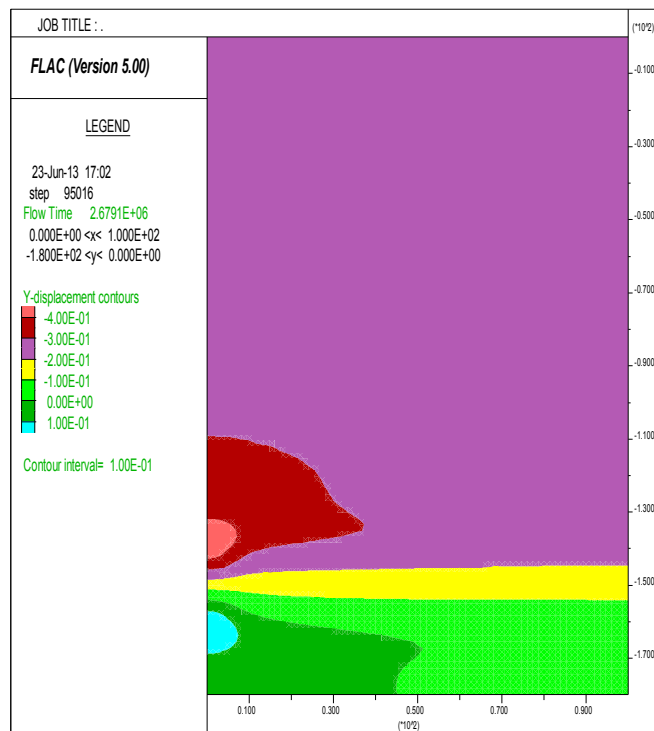
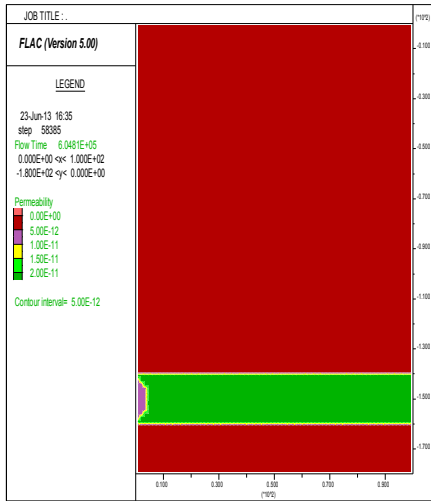


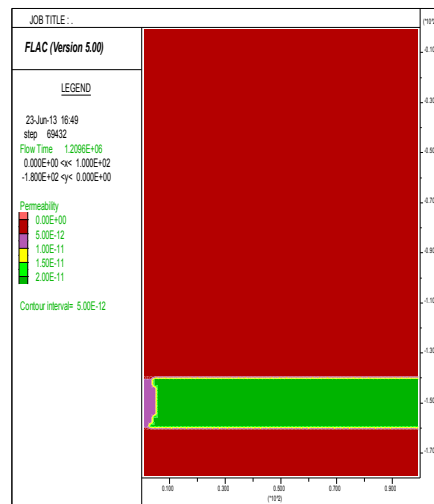
Fig. 4.64 Vertical displacement (1 month)

✓ 해리전파(투수율 변화) contour

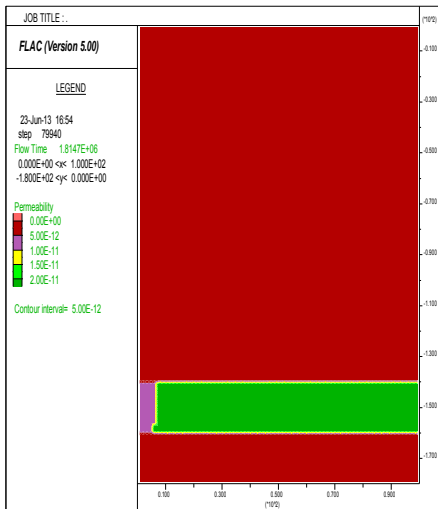
Fig. 4.65와 같이 해리 전파영역을 살펴본 바, 처음 1주는 5.32 m, 2주는 5.32 m로서 해리전파 수평거리는 동일하지만 2주가 1주에 해리 면적이 넓은 것을 볼 수 있고 3주는 6.65 m, 1달은 9.31 m로 해리전파범위는 4.2.1(3) 연구대상 후보지(포화도 0.5)와 동일하여 특별한 차이를 확인할 수 없었다.



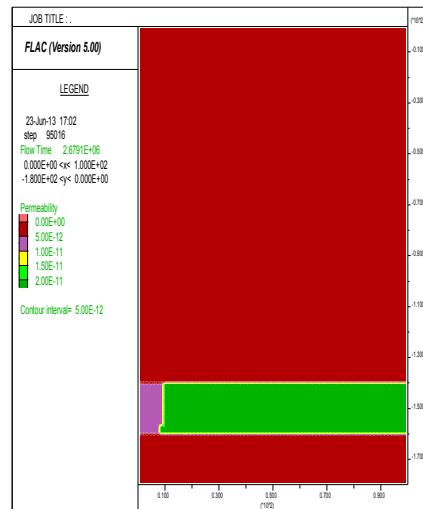
(a) 1st week: horizontal dissociation up to 5.32m



(b) 2nd week: horizontal dissociation up to 5.32m



(c) 3rd week: horizontal dissociation up to 6.65m



(d) 1month: horizontal dissociation up to 9.31m

Fig. 4.65 Permeability change (range of diffusing dissociation)

Fig. 4.15와 같이 GH 생산부 인접 지점(P1), 4 m이격된 P_side1/P_side2, 8 m 이격된 지점에서의 압력 추이를 아래 Fig. 4.66과 같이 살펴본다. 해리전후 투수율 및 강성 차이가 적어서 31일 내내 압력 변동이 없이 P_side1, P_side2 및 P2의 공

극압력 변화가 비교적 일정한 것을 볼 수 있고 따라서 아래 Fig. 4.67과 같이 시간 대 침하 그래프에서도 급격한 침하 없이 일정하게 침하되는 것을 볼 수 있다.

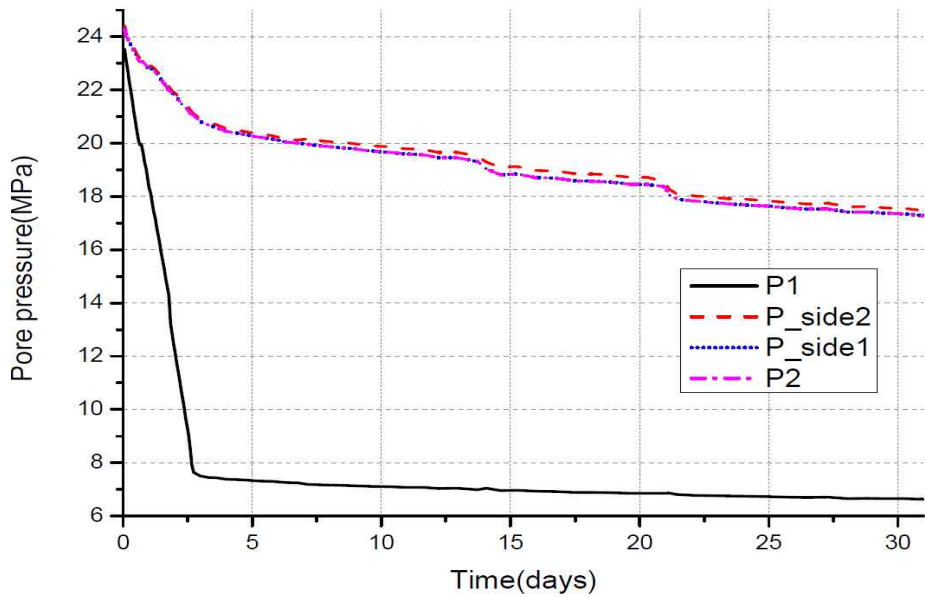


Fig. 4.66 Pore pressure vs. time (1 month)

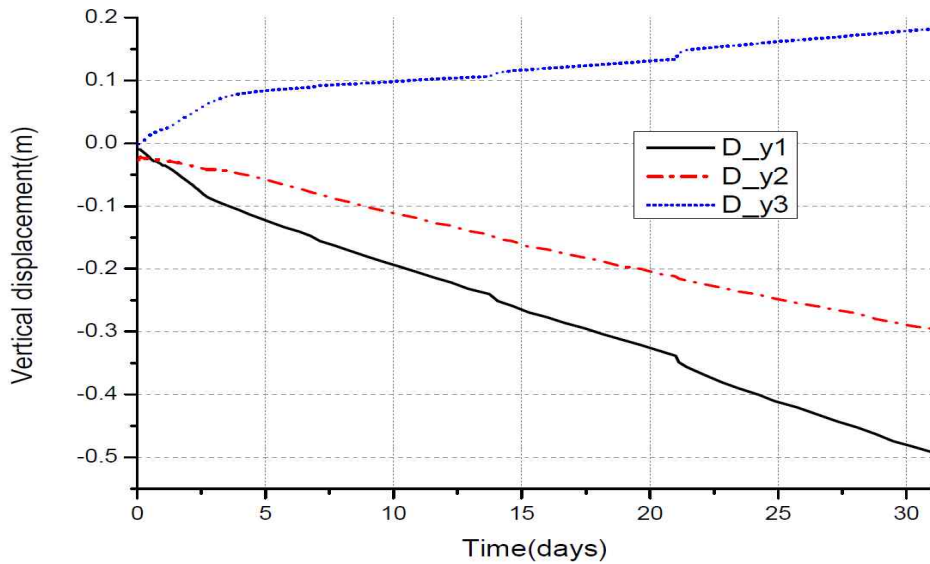


Fig. 4.67 Vertical settlement vs. time (1 month)

Table 4.28 Summary of results($Sh=40\%$)

[unit: m]

	1week	2weeks	3weeks	1month	remarks
Max. Subsidence	0.15	0.25	0.34	0.50	D_y1
Range of dissociation	5.32	5.32	6.65	9.31	horizontal direction

③ 가스하이드레이트 포화도에 따른 지반역학적 거동 분석

Fig. 4.68은 연구대상 후보지(UBGH-X) 물성과 최종 목표압력(7 MPa)과 동일하게 하고, GH포화도를 각각 0.4(black), 0.5(red), 0.6(blue)로 case 별로 해석하였을 때 감압 시 시간에 따른 침하량을 나타낸 그래프이다.

GH포화도가 클수록 침하량이 증가하는 경향성을 확인 할 수 있다. 이는 포화도가 커짐에 따라 초기 강성이 커지고 이에 따라 해리전후 강성차이가 많이 나고 또한 해리전후 투수율 차이가 많아지므로 그 만큼 침하량이 늘어나기 때문이다.

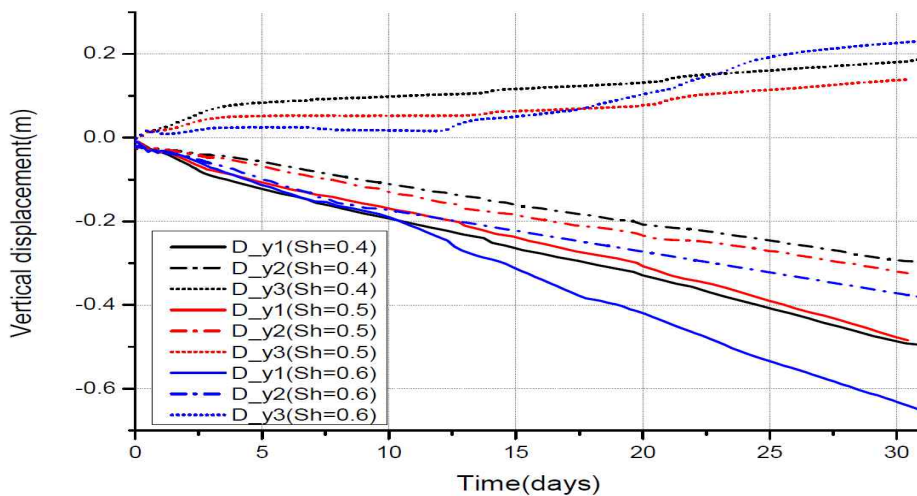


Fig. 4.68 Vertical displacement according to different gas hydrate saturation

다만, GHS 직상부 D_y1에서는 포화도 0.4와 0.5가 차이가 거의 나지

않지만 해저면 0 mbsf에서는 포화도가 크면 침하량이 커지는 뚜렷한 경향성을 볼 수 있다. $Sh=0.4$, 0.5 에 비해 $Sh=0.6$ 은 10일 후부터 침하량이 늘어나는 현상은 볼 수 있는데 이는 초기강성이 크므로 해리전후 강성차이가 많이 나고 시간이 경과할수록 강성이 적은 해리구역이 많아지면서 지반을 지지하는 힘이 약 10일 시점에서 급격이 줄어들면서 발생하는 현상으로 판단된다.

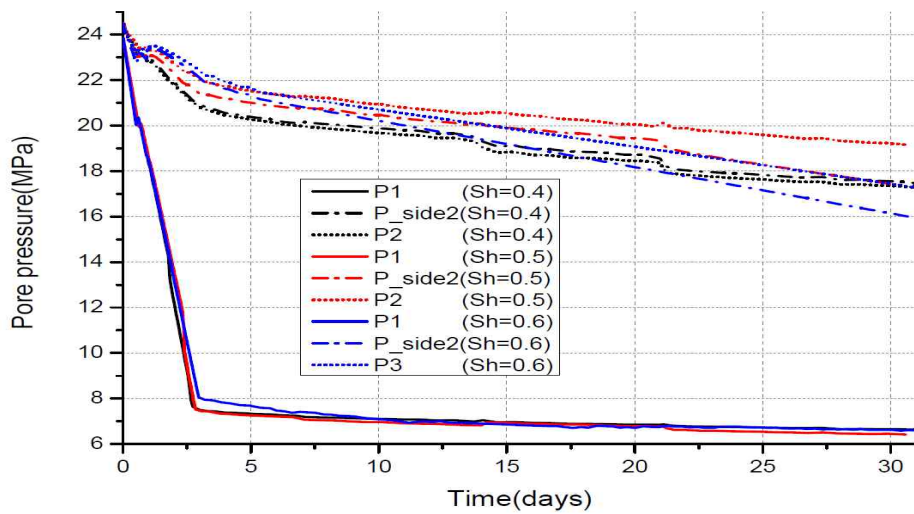


Fig. 4.69 Pore pressure vs. time according to gas hydrate saturation

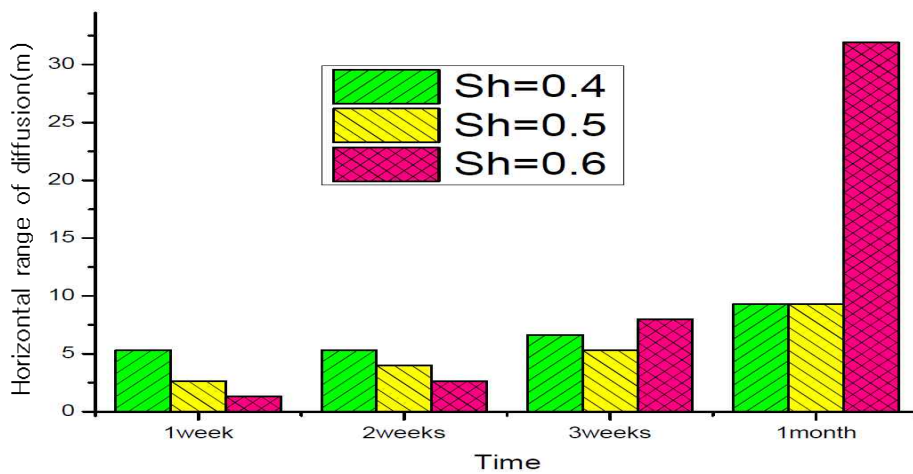


Fig. 4.70 Horizontal range of dissociation according to gas hydrate saturation

Fig. 4.69와 같이 $Sh=0.5, 0.6$ 의 경우가 $Sh=0.4$ 의 경우보다 P_{side2} 및 P_2 의 압력 변동이 큰 것을 볼 수 있다. 이로 인해 2주 이후부터는 $Sh=0.5$ 및 $Sh=0.6$ 의 해리전후 큰 투수율 차이와 강성차이 때문으로 연관 지을 수 있다.

Fig. 4.70은 포화도 변화에 따른 수평해리 전파 범위를 그래프로 표시한 것으로서 1주 내지 3주간에는 포화도가 작은 경우가 오히려 해리전파가 많이 발생하다가 3주 때부터는 역전하여 1달째에는 $Sh=0.6$ 인 경우 해리전파 범위가 급격하게 늘어나는 것을 볼 수 있다.

이는 $Sh=0.6$ 은 $Sh=0.4$ 에 비해 초기 강성이 크므로 감압초기에는 해리전 강성을 차지하는 Sediment가 많아 상부지층을 충분히 지지하다가 시간이 지나 3주를 경과하면서 해리구역이 점점 넓어져서 그만큼 상부지층을 지지할 수 있는 강성이 저하되면서 3주 내지 1달 사이 시간에 급격히 지반 지지력을 잃어 침하가 급격히 늘어나는 현상으로 보인다.

또한 GH 포화도($Sh=0.6$)의 경우는 $Sh=0.4$ 에 비해 해리후의 volume 차이가 많이 나므로 이 또한 침하량에 많은 영향을 미친다 하겠다.

5. 결론

이 연구에서는 산업통상자원부 주관으로 동해 울릉분지에 실시예정인 감압법을 이용한 가스하이드레이트 시험생산(2015년 예정)에 앞서, 울릉분지 현장시추코어시료에 대한 감압법 적용 침하실험결과를 FLAC^{2D} 해석 및 이론해의 산출결과와 비교하여 적용타당성을 확인하고 FLAC^{2D}를 이용하여 시험생산 후보 대상지 UBGH-X(울릉분지 GH 시추 지역 중 1 곳) 현장조건인 200m(너비)×180m(높이)로 수치해석 모사를 실시하였다. 또한 시험생산 후보지 현장조건을 기초로 하여 감압법에 의한 가스하이드레이트 생산 시 고려해야할 중요한 파라미터인 감압속도, 공저압, 공극률, 투수율, 가스하이드레이트 포화도 등 5가지에 대한 민감도 분석을 실시하였다. 그 주요 결론은 다음과 같다.

1) 고속 감압(감압시작과 동시에 목표압력 도달)과 저속감압(0.24 MPa/hr)을 적용하여 31일간 공극압과 침하량을 비교 분석한 바, 공극압의 변화는 초기 5일간의 공극압 변화만 차이가 날 뿐 최종 31일경에서의 최종 도달 압력에서는 차이가 없었으나, 침하량의 경우는 고속감압의 경우 초기 침하량이 저속감압 침하량보다 커서 최종침하량도 4%정도 많이 발생하였으므로 저속감압이 초기 지반 안정성에 유리한 것으로 판단된다. 특히 저속감압 시 단열팽창으로 인한 GH 재생성 현상을 방지하여 지반 안정성에 유리하므로 1주 내지 2주에 걸쳐 실시예정인 시험 생산 뿐 아니라 상업생산에서 저속감압은 반드시 필요하다고 판단된다.

2) 시추공 주변 최대 침하 부위는 31일간 감압법 적용시, 해저면(침하량: 0.324 m) 보다 가스하이드레이트층 직 상부(침하량: 0.484 m)에서 침하가 49%이상 크게 발생하는 것으로 확인되었다. 이는 상부지층은 GH가

3%만을 함유하는 미고결층으로서 침하하는 부분을 지지하지 못하고 흘러 내려서 침하부위를 메우면서 함몰부위를 형성하지 않고 일정하게 침하하기 때문인 것으로 생각된다. 한편 GHS 하단지층 부분(160 mbsf)에서는 소규모 용기현상이 나타났는데 이는 생산정 주변에서 GH가 해리되면서 가스 및 물이 차압으로 인해 생산정 천공부 쪽으로 비스듬하게 상향 유동이 발생하면서 연약지반의 미 고결층의 하부지층도 함께 끌어올리기 때문으로 판단된다. 따라서, 시험 시추 공정 계획 시 지반안정성에 가장 취약한 GHS 직 상부 부분에 초점을 맞추어 공정계획을 수립하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

3) 연구대상 후보지 UBGH-X의 해리 수평방향 거리는 31일간 감압법 적용에도 9.3 m에 불과했는데 이는 상부층의 압밀작용으로 해리시 유효응력이 증가하고 이로 인해 투수율이 감소된다는 감소벡터 이론을 적용하여 설명할 수 있다: 실제 현장조건인 2150 mbss의 해수와 140 mbsf 상부지층 지반 압축으로 샌드 입자가 clogging을 일으켜 투수율이 감소된다. 참고로 일본정부에서 '13년 3월 12일부터 18일까지 실시한 감압법 시험 생산에서 해리전파거리가 10 m이하로 모니터링 웰에서 측정된 바 있다.

4) 연구대상 후보지 물성을 이용하여 시험생산 예상 공저압 7 MPa을 기준으로 10 MPa 및 4 MPa에 대한 지반 역학적 거동해석 실시하여 공저압 변화에 따른 경향성을 분석한 바, 감압정도(ΔP)가 클수록 침하량 및 수평해리 전파거리가 증가하는 뚜렷한 경향성을 확인할 수 있었다. 이는 감압정도가 클수록 평형압력(20 MPa) 이하에 도달하는 구역이 늘어나기 때문인데, 목표감압 10 MPa인 경우에 비해 7 MPa 또는 4 MPa인 경우에는 압력변동(fluctuation)으로 압력 교란이 발생하면서 21일 이후부터 침하량 및

수평해리전과 거리가 늘어났으므로 목표 감압을 7 MPa 이하로 설정한 경우 20일 이후에 지반침하로 인한 대책을 강구하는 것이 바람직하다.

5) 연구대상 후보지 물성과 시험생산 예상 공저압(7 MPa)은 그대로 두고 울릉분지 2차 시추지역 물리검층 및 코어분석자료(신효진 등., 2012)에 개시된 공극률 분포도 63.96% ~ 71.35%에서 최소 최대 공극률인 64%와 71%를 각각 적용하여 공극률 변화에 따른 경향성을 분석한 바, 공극률이 클수록 침하량 및 수평해리 전과거리가 증가하는 뚜렷한 경향성을 확인할 수 있었고, 이는 이 논문에서 사용한 투수율 추정식에 의하면 공극률이 클수록 해리 후 투수율이 커지기 때문이다. 다만 공극률이 71%인 경우에는 가스하이드레이트층 직상부가 초기에 상승하다가 다시 침하하는 현상을 볼 수 있었는데 이는 공극률이 커서 공극내 공극수가 많아 감압으로 물을 suction하는 과정에서의 압력변동으로 판단된다. 따라서 공극률이 큰 가스하이드레이트층에서 GH를 회수하는 경우에는 초기 수직변위 변동을 고려하여 시추공정계획을 세우는 것이 바람직하다.

6) 연구대상 후보지 물성과 시험생산 예상 공저압(7 MPa)은 그대로 두고 초기투수율의 1.5배 및 0.5배를 각각 적용하여 투수율 변화에 따른 경향성을 분석한 바, 초기 투수율이 클수록 침하량이 증가하는 뚜렷한 경향성을 확인할 수 있었다. 이는 초기 투수율이 커짐에 따라 공극압력 감압 전이가 빨라지고 이에 따라 해리전과 영역이 넓어져 많은 구역이 해리되므로 그 만큼 침하량이 늘어나기 때문이다. 공저압에 따른 지반 거동 경향성 분석 시와 유사한 패턴으로 2주 이후부터 해리 전과범위 및 침하율이 급격하게 증가하였는데 이는 시간에 따른 공급수압에 1주 이후부터 압력교란이 발생하면서 해리가 급격하게 진행되기 때문인 것으로

판단된다. 따라서 투수율이 큰 GHS층에서 GH 회수 생산 시에는 1주 이후 지반 침하에 대한 대책을 세우는 것이 바람직하다.

7) 연구대상 후보지 물성과 시험생산 예상 공저압(7 MPa)은 그대로 두고 GH포화도에 각각 0.6, 0.4를 적용하여 경향성을 분석한 바, GH포화도가 클수록 침하량이 증가하는 경향성을 확인 할 수 있었다. 이는 포화도가 커짐에 따라 초기 강성이 커져서 해리전후 강성차이가 많이 나고 해리전후 투수율 차이가 많이 나기 때문인 것으로 볼 수 있다.

시험생산 후보지 현장조건으로 한 수치해석 결과와, 이 조건을 기초로한 주요파라미터에 대한 민감도 분석결과는 향후 시험생산을 위한 시추공정 계획 시 뿐만아니라 울릉분지 상업생산 시에도 참고자료로 활용 가능할 것으로 기대된다.

GH 회수생산이 고려되는 주요 파라미터인 공저압, 공극률, 투수율, GH포화도에 대한 경향성 분석결과 4가지 모두 증가함에 따라 지반 침하량이 커지는 경향성을 보이나 이를 검증할 만한 GH 해리 시 침하에 관련된 실험결과 자료가 국·내외 전무한 실정이므로 이러한 실험이 시급한 상황이다. 이에 따라 GH 지반안정성 실험으로 지반침하 검증의 한계성을 극복하고자 한국가스공사와 지질자원연구원의 협동과제로 지난 1년간 설계·제작과정을 거쳐 부록A와 같이 GH 지반안정성분석 시스템 구축하였다. 향후 이 시스템을 통하여 다양한 파라미터를 고려한 지반안정성 실험결과 데이터를 구축 및 체계화함으로써 연구를 더욱 발전시킬 계획이다.

부록A. 가스하이드레이트 지반안정분석시스템 구축

A1 필요성

대부분의 가스하이드레이트 저류층 및 주변 퇴적층은 미고결 상태로 존재하고 있어, 가스 회수 생산시 이 퇴적층이 변형되거나 침하됨에 따라 해저 생산 시설물이 손상되고 가스가 대기로 누출되어 생산성의 급격한 저하와 환경오염 등의 문제를 야기 시킬 수 있다(류병재, 2005). 하지만 이러한 중요성에도 불구하고 저온 고압의 GH 생성조건으로 인한 GH 층 및 주변 퇴적층의 침하에 대한 수치해석 모사 사례는 적지 않게 찾아볼 수 있었으나, 관련 실험은 세계적으로 거의 그 사례를 찾아보기 힘든 실정이며 특히, 이 과정을 육안으로 관찰할 수 있는 장치는 전무한 상태이다. 따라서 GH 층의 공극률·투수율, 감압률, 해리속도간의 상관관계에 따른 GH 층의 변형 및 침하현상을 실험과 육안(카메라 촬영)으로 규명함으로써 향후 시험 및 상업생산시 현장에 본 연구 분석 기술자료를 적용코자 한다.

A2 시스템 주요구성

Fig. A.1은 지반안정분석 시스템의 전체사진이다. ①은 GH 생성조건을 신속·정확하게 형성하기 위한 항온·항습기로서, 내부에는 고압반응셀과 관찰용 현미경 카메라가 설치되어 있다. ②는 Fig. 3.2의 고압반응셀의 시창에 설치된 8개의 현미경 카메라의 영상을 디스플레이 해주는 모니터이고, ③은 질소, 천연가스, CO_2 등의 가스 압력을 조절할 수 있는 각종 다이얼과 스위치가 부착되어 있고 고압반응셀의 압력을 감압할 수 있는 솔레노이드 밸브 등이 설치되어 있는 컨트롤 보드이며, ④는 시료를 입출하기 위해 상하부가 볼트너트 체결식으로 구성된 고압반응셀 상부캡(약 35kg)을 상하로 들어 올리거나 내릴 수 있도록 호이스트가 설치된

작업선반이다. Fig. A.2는 실제 작업선반 활용예를 보여준다



Fig. A.1 System of analyzing stability on gas hydrate specimen



Fig. A.2 Shelf to put sands into the high pressure cell

Fig. A.3의 스테인레스 스틸 재질 원통형 고압반응셀은 GH를 인공모사하기 위한 직경 15cm 높이 20cm이내의 시료가 형성 가능하고 잠금장치를 볼트너트 방식으로 제작하여 고압제어가 가능하며 질소를 이용하여 상부실린더를 가압하여(overburden) 미고결 다공성 매질을 압축할 수 있는 공압 실린더(pneumatic cylinder)로 구성되어 있다. 여기에서 가스주입과 물주입 라인은 정확한 포화도 조정과 GH를 균일하게 제작하기 위해 고압셀하부에 20 마이크로 필터를 콘(corn) 형식으로 장착하여 최대한 고르게 퍼지도록 제작하였다. 가스주입노즐은 인공규사 전체에 가스가 주입할 수 있도록 분사타입이다(Fig. 3.3). 고압셀 상부 면에는 전체적인 지반 변형침하 현상을 측정하기 위해 $\times 75$ 배율의 전동 줌 현미경과 미세침하 현상 측정을 위해 $\times 100$ 배율 수동 줌 현미경을 각각 1대씩 설치하였고 측면관찰을 위한 사파이어 구간은 $\times 200$ 배율 수동 줌 현미경 4대와 $\times 75$ 배율 전동 줌 현미경 2대를 설치하여 총 8대의 현미경 카메라를 설치하였다. 측면 및 하부 각 위치에 대한 압력·온도변화를 확인할 수 있도록 압력 및 온도센서를 측면에 9개 하부에 3개 총 12개를 부착하였고 그 중 하나를 항온 항습기에 연결하여 반응기 내부온도를 제어코자 하였다. 다만 센서 전단에 교체 가능한 필터를 설치하여 설정 시료(모래)에 의해 센서 막힘 현상이 발생하더라도 즉시 교체가능토록 하였고 1/8" 피크튜브(peek tube)를 사용하여 데드볼륨(dead volume)을 최소화하였다.

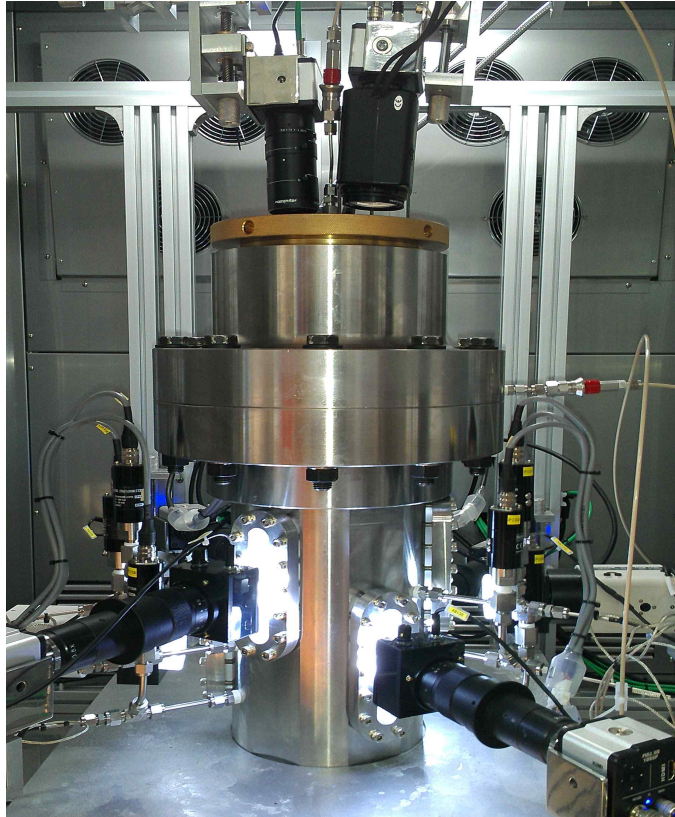


Fig. A.3 high pressure reacting cell for observing deformation of specimen

Fig. A.4과 같이 고압반응셀 상부 중앙에는 지반 변형·침하현상 관찰을 위해 투명한 폴리카본(poly carbon)을 설치하였으며 그 아래에는 오버버든(overburden) 재현을 위한 공압 실린더 압축부에 일정압력으로 압축 가능하면서 육안확인 가능토록 고강도 수정(quarz)으로 구성되었고 이 수정플레이트에 수평방향의 변형을 측정하기 위해 mm 단위 눈금(scale)을 6개 방향으로 부착하였다. 수정과 폴리카본 중앙을 관통하는 메탄 생산관을 설치하여 현장 생산정과 그 주변 저류층 사이의 유동현상이 재현되도록 모식화하여 가스 생산회수가 생산정 천공부 부터 시작하도록

제작하였고 수직변형(vertical displacement)을 측정하기 위해 메탄 생산관에 레이저용접으로 3 mm간격으로 핀을 레이저 용접하여 단위눈금을 표시하였다(Fig. A.5). 다만 가스 생산 시 생산관으로 모래가 같이 생산되는 것을 방지하기 위해 생산관 끝단에 다공성 스테인레스재질 필터를 용접설치 하였다(Fig. A.5).

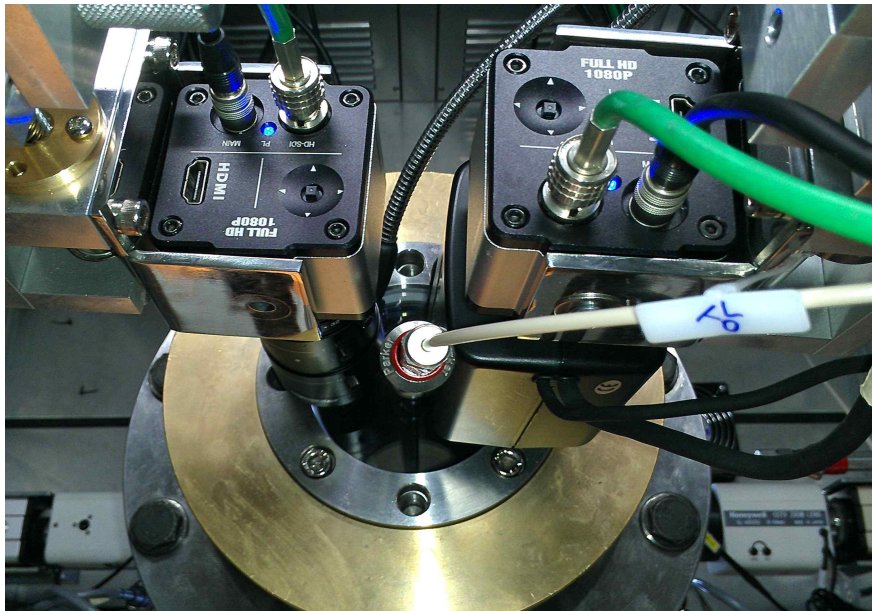


Fig. A.4 Upper part of high pressure cell.



Fig. A.5 production pipe with vertical scale

Fig. A.6과 같이 측면에는 GH 생성 및 해리현상 관찰을 위해 폭 1.5 cm 사파이어(sapphire)를 측면 상·하 각 3개씩 120° 각도로 설치하여 육안 관찰 가능토록 하였다. 마이크로 단위의 미세현상을 관찰하기 위해 고배율 현미경을 사용하여 시료 모래 사이 공극에 GH 형성·해리 및 지반변형·침하 현상을 관찰 가능케 하였다.



Fig. A.6 Lateral part of the high pressure cell

가스노즐은 고압용 플렉시블/퀵 커넥터를 이용하여 탈착이 용이하게 설치하였고, 니들밸브를 이용하여 가스투입 후 밀폐 가능토록 설치하였으며 Fig. A.1 ③의 컨트롤 박스에 유량제어 및 투입된 총량 그리고 온도 10개 지점, 압력 10개 지점을 지시하는 컨트롤러 및 인디게이트를 장착하여 Fig. A.7와 같이 PC와 통신할 수 있게 하였다.

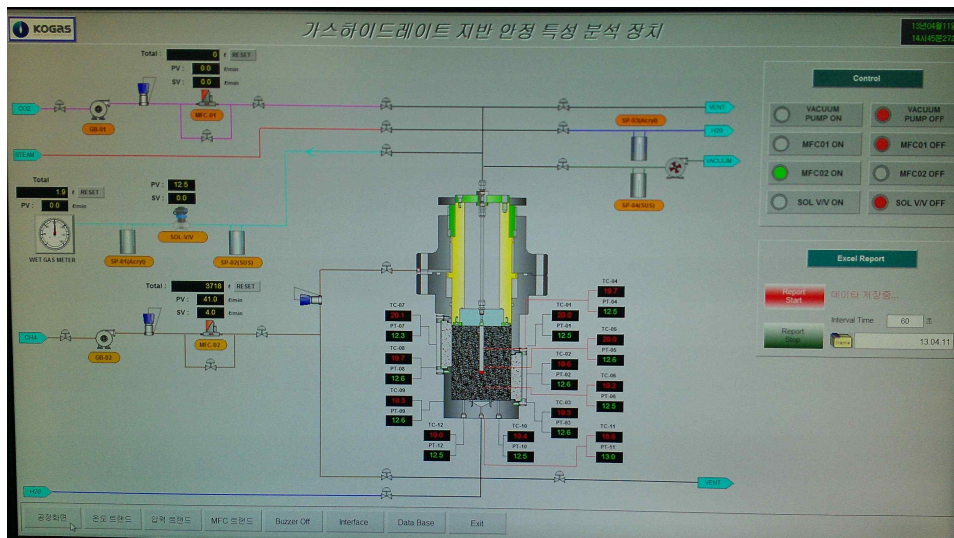


Fig. A.7 Monitoring System of analyzing stability on specimen

A.3 기타 주변 구성

Fig. A.8의 Sloan의 평형압력 도출 프로그램은 메탄, 에탄, 프로판, 부탄 등 가스의 특성을 모두 적용가능하고, GH의 온도를 적용했을 때, 그에 해당하는 평형압력 조건이 디지털화되어 산출되도록 하는 소프트웨어이다. 고압반응셀에 연결된 총 12개 온도센서의 평균값을 적용하여 GH 평형압력 값을 도출해 내었다.

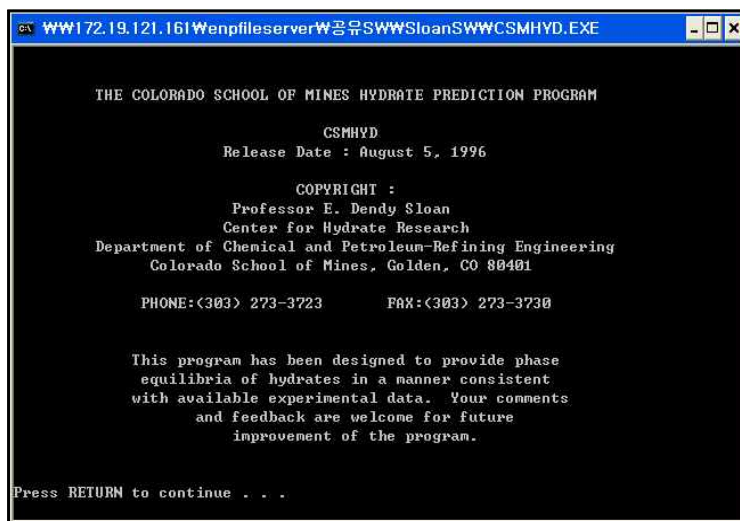


Fig. A.8 program computing equilibrium pressure by Sloan

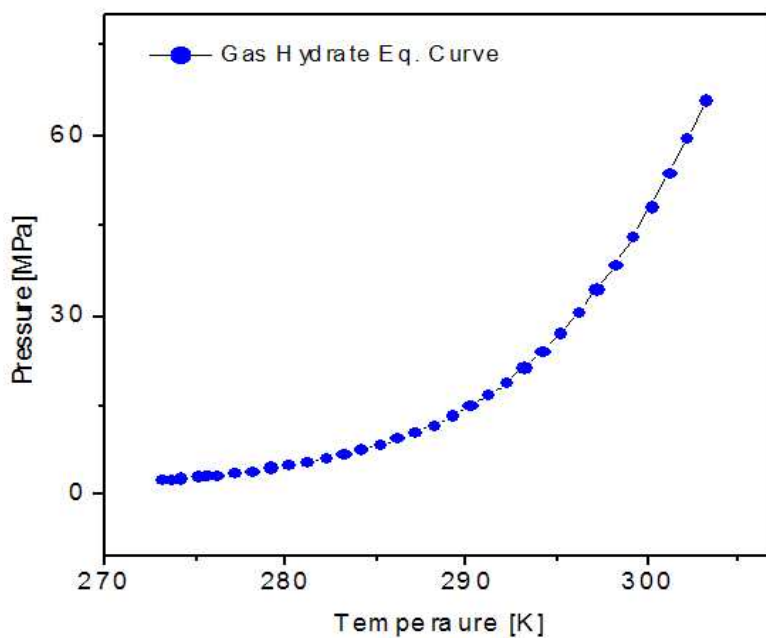


Fig. A.9 Equilibrium pressure and temperature curve

평형압력 값이 주어짐으로써 Fig. A.8와 같이 평형압력, 온도의 안정 영역으로부터 솔레노이드밸브를 통해 평형압력 대비 감압을 실시가 가능하다. 본 실험에서 솔레노이드 밸브는 Fig. A.10상부 ①와 같고 이는 설정압을 디지털 입력하여 그 설정압에서 밸브가 닫힘으로써 감압을 조절하는 장치로, 생산과정에서 생산운영압력을 일정하게 유지시켜 감압법에 의한 GH 생산기법을 원활히 수행할 수 있었다. Fig. A.10의 하부는 가스 회수 생산시 가스 생산량 측정이 가능한 습식가스메타(wet gas meter)이다.

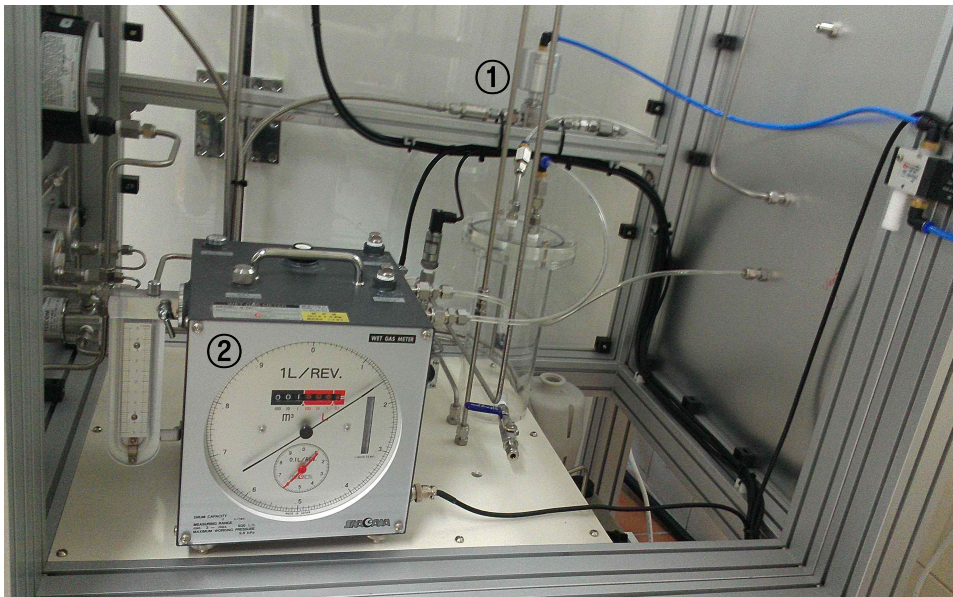


Fig. A.10 Solenoid valve and wet gas meter

A.4 지층안정분석 시스템 프로세스

Fig. A.11은 지층안정 분석 시스템의 전체 모식도를 보여주는 것으로써 GH 고압셀의 인공규사 최대 수용능력은 8L이며 가스봄베로부터 인입되는 메탄가스의 정압주입시 압축기의 최대 출력은 200bar로써 가스가 목표압력에 원활히 도달할 수 있게 해 주었다. 또한 MFC를 장착하여 가스 유입량을 확인 할 수 있게 하였으며 해리 시 생산되는 메탄가스량은 wet gas meter를 통해 기록하였다.

항온 순환수조의 온도범위는 $-20\sim 50^{\circ}\text{C}$ 로써 GH를 형성하는데 있어 온도조건을 충분히 충족시킬 수 있게 하였다. 유량제어 및 투입한 총량 그리고 온도 및 압력을 트랜드로 볼 수 있게 하였고 압력 온도 전송기는 측면에 120° 간격으로 각3개 하부에 3개 총12개를 설치하였다(편의상 8개만 표시). 그리고 Fig. 3.11과 같이 separator를 wet gas meter라인에 물이 들어가지 않도록 고압용(스테인레스) 및 저압용(Acryl) 각1개, Vacuum라인에 고압용(스테인레스) 1개, 물 배출라인에 저압용 1개의 Separator를 설치하였다. 이중 wet gas meter의 분리기는 계량눈금이 있는 시창을 설치하여 가스와 함께 나온 물의 양을 측정할 수 있도록 하여 wet gas meter에 물이 들어가지 않게 할 뿐만 아니라 수 포화도를 조정할 때 활용할 수 있게 하였다.

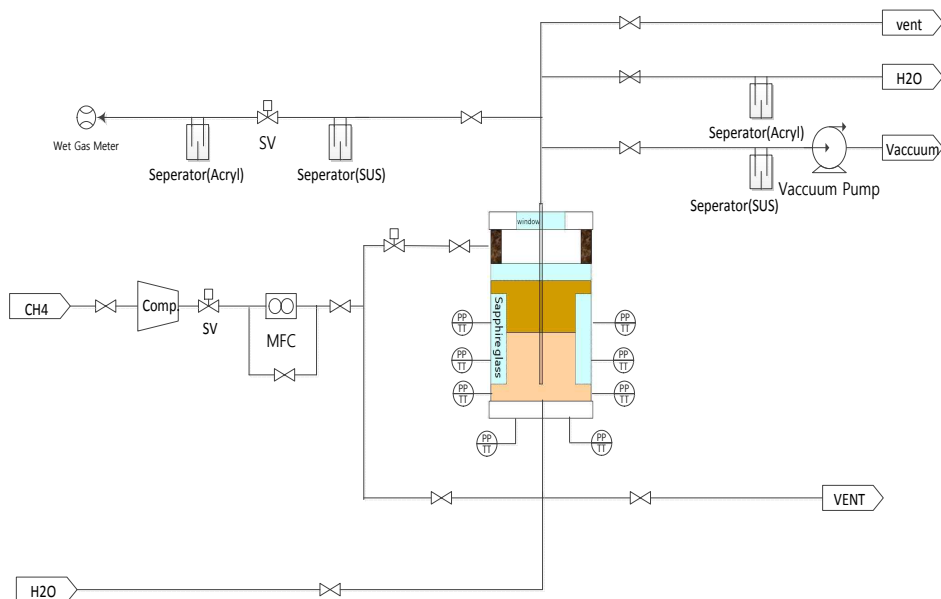


Fig. A.11 system of analyzing stability on hydrate sediment



Fig. A.12 acryl separator and stainless separators(with window scale)

부록 B 가스하이드레이트 인공토적층 모사

B.1 실험용 인공규사 선택

실제 동해안 GH 부존지역의 시추를 통한 입자크기를 분석한 결과 Fig. B.1과 같이 60~120 μm 의 size가 가장 많은 것으로 나타났다

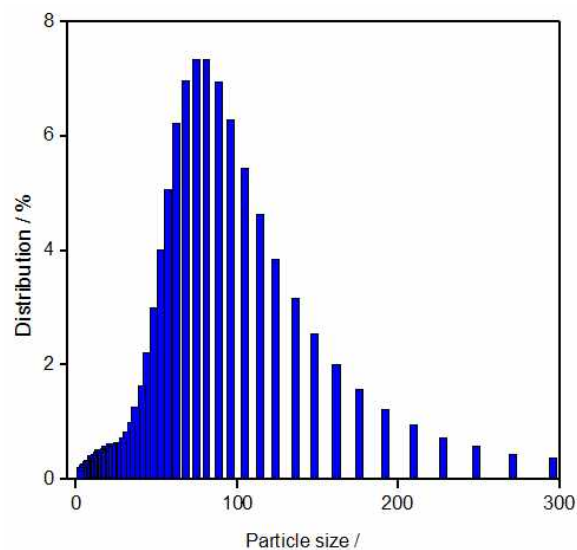


Fig. B.1 Distribution of Particle size (μm) of gas hydrate sediment at Ulleung basin

따라서 울릉분지와 가장 유사한 미고결 인공규사를 Table 4.1과 같이 2가지 시료로 압축하였다. Table 4.1은 본 실험에서 사용된 미고결 인공규사의 특성을 나타낸 것이다. 본 실험에서는 GH 저류층을 모사하기 위해 균질한 투과성을 가진 Hama산업의 미고결 인공규사를 사용하였다. 실제 동해안 퇴적층의 모사를 위해 미고결 인공규사 Hama #7과 #8의 특성을 분석한 결과 두 시료의 공극률은 큰 차이를 보이지 않았으나, 입자크기는 약3.2배, 투수율은 약 18배 차이를 보이는 것으로 확인 되었다.

Table B.1 Properties of artificial silica sand used in experiment and simulation

Sediment	Hama #7	Hama #8
Particle [μm]	Mid. 258	Mid. 80
Porosity [%]	42.0	36.0
Permeability[mD]	4,418	244.9
S_{wi} [%]	10~70	10~70
S_{hyd} [%]	Max 24.0 at S_{wi} 30%	Max. 35.3 at S_{wi} 40%

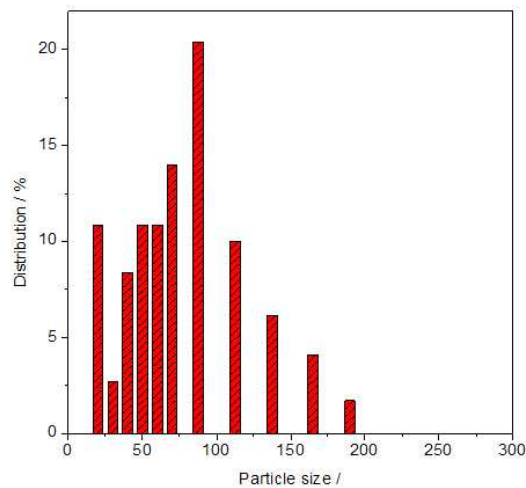


Fig. B.2 Distribution of particle size of artificial silica sand, Hama sand #8 (μm)

실제 시추를 통해 동해안 GH 부존지역의 60~120 μm 의 particle size가 가장 많이 분포한 동해안 퇴적층과 가장 유사 하다고 판단되는 미고결 인공규사 #8을 선택하는 것이 바람직하다. 그림 B.2는 미고결 인공규사 #8의 입자크기를 분석한 것으로써, 분석방법은 진동기를 사용하여 45~180 μm 크기에 속하는 sieve를 통해 각 sieve에 걸려진 sand의 양을 측정 한 것이다.

B.2 인공 가스하이드레이트 형성 방법

본 실험에서는 가스하이드레이트 저류층을 모사하기 위해 균질한 투과성을 지닌 하마산업의 미고결 인공규사를 사용하였다. 각각의 사용된 미고결 인공규사는 초기 불순물을 제거하기 위해 이온교환수로 3번 세척하였으며, 100℃의 온도에서 24시간 동안 건조하였다. 건조 후 미고결 인공규사에서 다량의 자성을 띄는 물질을 제거하기 위해 magnetic treatment를 실시하였다. 미고결 인공규사 충전 작업 후 진공펌프를 이용하여 진공상태로 만들고, 실제 지층 압력의 재현성을 모사하기 위해 질소를 이용하여 미고결 인공규사가 충전된 반응기 상부 실린더를 약 10 MPa로 가압하여 동해안 해저면 공극률 및 투수율과 유사한 조건을 모사하였다. 초기 수포화도 구성에 필요한 물은 진공상태에서 주입하였다. 또한 GH 저류층을 인공 모사한 퇴적층에 사용된 미고결인공규사의 입자사이즈는 수은기공도 측정기(quantachrome Poremater PM-33)를 사용하여 측정하였다.

B.3 실험 방법

가스하이드레이트 회수 실험은 크게 2단계를 거친다. 1단계: 미고결 다공성 매질 내에 GH를 형성하는 형성단계, 2단계: 불균형하게 형성된 GH를 균일하게 분포시키는 균질화단계, 3단계: 미고결 다공성 매질 내에 균일하게 맞춰진 물과 가스로 다시 GH를 생성하는 재형성단계, 2단계: 회수 기술을 통하여 GH에서 가스를 생산하는 해리단계로 나뉜다. Fig. B3는 3D GH 생산성 실험의 모식도로 GH 형성 및 해리 그리고 메탄 회수의 실험절차를 나타내었다.

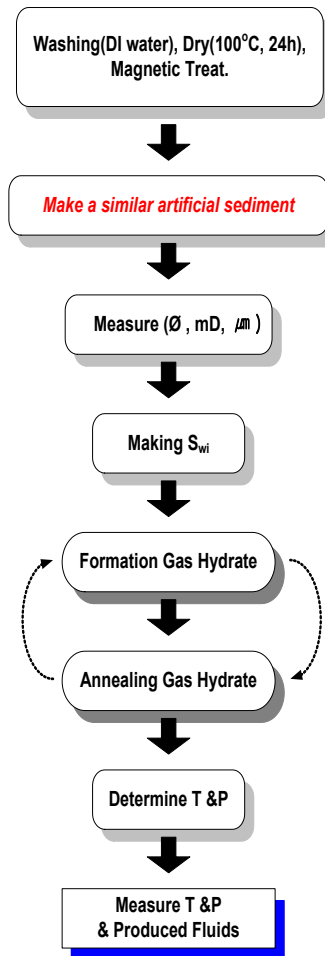


Fig. B.3. Experimental process for production GH

이온교환수로 세척 후 건조된 미고결 인공규사를 반응기 내부에 균일하게 충전 후 버니어캘리퍼스를 이용해 충전하고 남은 미고결 인공규사의 길이를 측정하여 반응기 내부에 충전된 미고결 인공규사의 총 부피를 알 수 있었으며, 동해안 인공퇴적층의 압력을 모사 가능한 반응기의 상부덮개를 닫아 조립 한다. 또한 순수한 메탄 주입을 통해 GH 제조 및 생산을 위하여 24시간 동안 진공 처리를 하였다. 진공처리가 끝난 후 실

제 지층의 압력을 재현하기 위해 질소를 이용해 반응기 상부로부터 overburden 압력을 약 9.5 MPa 주입하였다. 이 후 초기 수포화도의 값에 따라 인공퇴적층 내부에 이온교환수를 주입하였으며, 이때 반응기 내부는 이미 진공상태이기 때문에 이온 교환수는 자연적으로 주입이 되었다. 수 포화도에 따라 이온 교환수 주입량을 계산하여 주입하였다.

미고결 다공성 매질을 압축 후 약 9.5 MPa의 메탄가스를 주입하고, 항온 순환수조의 제어방식을 프로그램 타입으로 구성하여 온도를 10step 까지 제어 할 수 있도록 하였으며, 초기온도를 3 ℃로 설정하여 24시간 동안 GH 형성을 실시하였다. 다만, 예비 실험시 초기온도를 영하로 설정하였으나 메탄생산관내에 물에 차서 영하의 온도로 인해 메탄생산관이 막히는 현상이 발생하여 초기온도를 3 ℃로 유지 할게 되어 GH 형성시간만 약 64시간이 소요되었다. 6시간의 유지구간을 두어 해리 상태를 유지 하였다. 이 후 GH가 미고결 다공성 매질의 공극 내에 최대한 균질하게 분포하기 위해 형성과 해리 과정을 3회 반복 시행 하였으며, 이것은 공극시스템 내부에 국부적으로 GH가 형성되어 발생된 이원화현상도 제거할 수 있었다. 이로써 1회 실험의 총 소요 시간은 4700분으로써 약 4일이 소요되었다.

GH 형성 후, 공극 부피 내 메탄가스가 차지하는 부피와 가스하이드레이트 형성에 의한 압력강하를 이용하여 식(1)과 같이 GH 포화도를 계산 할 수 있다.

$$S_{hyd} = \frac{V_{wd}}{172} \frac{\Delta P}{P_0} \frac{T_0}{T_f} \frac{1}{AL\Phi} \quad (1)$$

여기서 GH 1 m³에 포집되는 메탄가스의 양은 172 m³이라고 가정한다. Vwd는 공극 부피 중 메탄가스가 차지하는 부피[m³]이고, ΔP는 GH 형성에

의한 압력강하[MPa], P_0 는 표준압력, T_0 는 표준온도, T_f 는 GH의 형성온도 [K], A 는 시료의 단면적[m²], L 은 시료의 길이[m], Φ 는 시료의 공극률을 의미한다.

수 포화도는 최초 물 주입한 총양에서 가스주입으로 빠져나온 물을 계산하여 산출하였다.

상기 Sloan 평형압력 도출 프로그램에 따라 산출된 평형압력 대비 -20% 감압을 실시하였다. 솔레노이드 밸브 조작시 급격한 감압을 하게 되면 편차가 커지는 문제가 발생하므로 단계적으로 감압압력까지 낮추는 것이 중요하다. 감압하는 과정에서 흡탕물의 역류를 막기 위해 고압용 separator를 통과하도록 설치하였는데 우선 separator의 부피가 크기 때문에 전체압력이 감소하게 되는데 이로 인해 생긴 압력차를 최소화하기 위해 메탄가스를 separator에 감압압력과 동일하도록 주입한 후(단, MFC로 주입) 벤트시켜 빈 분리기를 채운 메탄가스의 부피를 측정하는 작업이 선행되어야 한다. 이후 감압압력으로 재주입하여 다시 감압압력과 동일한 압력으로 맞추고 솔레노이드밸브 설정압력을 단계적으로 줄여가면서 감압을 실시한다. 감압시 솔레노이드밸브 설정압력과 실제 감압되는 압력과의 편차가 발생하므로 이를 최소화 하기 위해 단계별로 감압압력까지 낮춰가며 감압시켜야 한다. 감압후 24시간이 지나고 해리가스 생산량이 줄어들고 해리가 완료되었거나 추가적인 해리의 진행이 없다고 가정하여 습식가스 메타를 통해 생산된 가스양을 측정하고 벤트 시키는데 감압압력에서 separator에 채워졌던 가스의 부피를 빼면 최초 메탄가스 주입량을 얻을 수 있게 된다. 벤트후 내부압력이 0이 되면 실험을 종료한다.

참 고 문 헌

김상규, 이영후, 오세봉, 2012, 토질역학 이론과 응용 p. 552.

류병재, 2005, 천연가스 하이드레이트의 특성, 형성·부존 및 탐사·개발, 대한지질학회지 제41권 제4호, pp. 555-578.

박성식, 2008, 가스하이드레이트 해리로 인한 해저사면의 붕괴에 관한 연구, 한국지구시스템공학회지, 제45권, 제2호, pp. 164-173.

박성식, 최현석, 김창우, 2009, 고결모래 지반 내에서 공극생성이 강도에 미치는 영향, Korean Geo-Environmental Conference, pp.199~209.

서광원, 임종세, 이재형, 2010, 울릉분지 1차 시추공 자료를 이용한 가스 하이드레이트 퇴적층 물성 예측, 한국지구시스템공학회지, 제47권 제1호, pp. 70~80.

신효진, 임종세, 김세준, 2012, 동해울릉분지 2차 시추지역 물리검층과 코어분석 자료를 이용한 가스하이드레이트 퇴적층 공극률 및 포화율 추정, 한국지구시스템공학회지, 제49권 제2호, pp. 175-185.

이영수, 왕지훈, 박정균, 성원모, 2009, 다중공 평판형 장비를 이용한 감압법과 열자극법에 의한 하이드레이트 생산성 분석, 한국공업화학학회지, 제47권 제1호, pp. 133-140.

이정환, 2009, 가스하이드레이트 생산기술 개발현황 및 미래전망, 한국지구시스템공학회지, 제46권 3호, pp. 387-401.

주익찬, 2013, 메탄 하이드레이트가 열 새로운 세상, 유진투자증권 기업 분석 보고서(3월 8일자).

지식경제부, 2011, 가스 하이드레이트 개발생산연구 보고서.

지식경제부, 2012, 가스 하이드레이트 개발생산연구 보고서.

한국지질자원연구원, 2010, 가스하이드레이트 회수생산 현장 적용성 연구 보고서.

허대기, 2005, 가스하이드레이트 기술개발 현황, 한국지구시스템공학회지, 제42권, 제3호, pp. 206-213.

Ahn, T., Lee, J., Lee, J., Kim, S., Park, C., 2012, Experimental investigation into the applicability of depressurization to dissociate methane hydrate in an unconsolidated sedimentary sample, Proc. of Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece, June 17~22, pp. 83-86.

Braja, M. D., 1998, Principles of Geotechnical Engineering, 4th Ed, Thomson & Learning, p. 764.

Brooks, E. J., Harher, S., Severinghaus, J., Bender, M., 1999, Atmospheric methane and millennial-scale climate change, Mechanism of global climate change at millennial time scales, American Geophysical Union, pp. 165-175.

Ghiassian, H., Grozic, J., 2011, Undrained triaxial testing of methane hydrate bearing soil specimens, Proc. of 7th International Conference on Gas Hydrates (ICGH) Edinburgh Scotland, United Kingdom, July 17-21, Paper ID 51.

Henriet, J.-P., Mienert, J. (eds.), 1998, Gas hydrates: Relevance to world margin stability and climatic change, Geological Society Special Publication No. 137.

Itasca Consulting Group Inc., 2011, FLAC^{2D} manual, Fourth Edition (Version 7.0).

Kimoto, S., Oka, F., Fushita, T., Fujiwaki, M., 2007, A chemo-thermo-mechanically coupled numerical simulation of the subsurface ground deformations due to methane hydrate dissociation, Computers and Geotechnics, Vol. 34, pp. 216-228.

Kurihara, M., Ouchi, H., Narita, H., Masuda, Y., 2011, Gas production from methane hydrate reservoirs, Proc. of 7th International Conference on Gas Hydrate (ICGH) Edinburgh Scotland, United Kingdom, July 17-21.

Kvenvolden, K.A., 2000, Gas hydrate and humans, *Annals of the New York Academy of Sciences*, Vol. 912, pp. 17-22.

Lee, J. Y., Santamarina, J. C., Ruppel C., 2010, Volume change associated with formation and dissociation of hydrate in sediment, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, Vol. 11, No. 3, Q03007.

Makogon, Y.F., 1997, *Hydrates of hydrocarbons*, PennWell Publishing Co., Tulsa, OK, 482p.

Masui A., Haneda H., Ogata Y and Aoki, K. 2006, Triaxial compression test on submarine sediment containing methane hydrate in deep sea off the coast of Japan. *Proc. of 41st Annual conference, Japanese Geotechnical Society*, July in Japanese.

Masui, A., Miyazaki, K., Haneda, H., Ogata, Y., Aoki, K., 2008, Mechanical properties of natural gas hydrate bearing sediments retrieved from Eastern Nankai Trough, *Proc. of Offshore Technology Conference, Texas*, OTC 19277.

Max, M.D., Pellanbarg, R.E., Hurdle, B.G., 1997, Methane hydrate, a special clathrate: its attributes and potential, *Naval Research Laboratory Report, NRL/6101-97-7926*, Washington, DC, 74p.

Miyazaki, K., Masui, A., Sakamoto, Y., Aoki, K., Tenma, N., Yamaguchi T., 2011, Triaxial compressive properties of artificial methane-hydrate-bearing sediment, Journal of Geophysical Research, Vol. 116, B06102.

Ng, M.Y.A., Klar, A., Soga, K. 2008, Coupled soil deformation-flow-thermal analysis of methane production in layered methane hydrate soil, Proc. of Offshore Technology Conference, Texas, OTC 19364.

Priest, J., Sultaniya, A., Clayton, C., 2011, Impact of hydrate formation and dissociation on the stiffness of a sand, Proc. of the 7th International Conference on Gas Hydrate (ICGH), Edinburgh, Schotland, United Kingdom, July 17~21, Paper ID 742.

Rutqvist, J., Moridis, G.J., Grover, T., Silpngramlert, S., Collett, T.S., Holdich, S.A., 2012, Coupled multiphase fluid flow and well bore stability associated with gas production from oceanic hydrate-bearing sediments, Journal of Petroleum Science and Engineering 92-93, pp. 65-81.

Saeki, T., Fujii, T., Inamori, T., Kobayashi, T., Hayashi, M., Nagakubo, S., Takano, O., 2008, Delineation of methane hydrate concentrated zone using 3D seismic data in the Eastern Nankai Trough., Proc. of 6th International Conference on Gas Hydrate (ICGH), Vancouver, Canada.

Sakamoto, Y., Kakumoto, M., Miyazaki, K., Tenma, N., Komai, T., Yamaguchi, T., Shimokawara, M., Ohga, K., 2009, Numerical study on dissociation of methane hydrate and gas production behavior in laboratory-scale experiments for depressurization: Part 3- Numerical study on estimation of permeability in methane hydrate reservoir, International Journal of Offshore and Polar Engineer, Vol. 19, No. 2, pp. 124-134.

Sakamoto, Y., Shimokawara, M., Ohga, K., Miyazaki, K., Tenma, N., Komai, T., Aoki, K., Yamaguchi, T., 2008, Field scale simulation for consolidation and gas production behavior during depressurization process of methane hydrate in marine Sediments, Proc. of Offshore Technology Conference, Texas, OTC 19283.

Sloan, E. D., 1998, Clathrate Hydrates of Natural Gas, 2nd ed., Marcel Dekker: New York.

Soga, K., Lee, S.L., Ng, M.Y.A., Klar, A., 2006, Characterisation and engineering properties of methane hydrate soils, Proc. of 2nd International Workshop on Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils, Singapore, Hight and Lerouil (eds), Taylor & Francis Group, Vol. 4, pp. 2591-2642.

Yondeda, J., Hyodo, M., Nakata, Y., Yoshimoto, N., Imamura, Y., Tenma, N., 2011, Localized deformation of methane hydrate-bearing sand by plane strain shear tests, Proc. of the 7th International Conference on Gas Hydrates (ICGH) Edinburgh Scotland, United Kingdom, July 17-21, Paper ID 424.

Yun, T.S., Santamarina, J.C., Ruppel, C., 2007, Mechanical properties of sand, silt, and clay containing tetrahydrofuran hydrate, J Geophys. Res., 112, B041064.

Abstract

Numerical Analysis for Prediction of Mechanical Behavior of Marine Sediment during Depressurization Process of Gas Hydrate

Dae-hee Lim

Department of Energy Systems Engineering

The Graduate School

Seoul National University

Gas hydrate (GH) is estimated to meet all the energy demand of the world for about 5,000 years. East Sea of Korea also seems to have GH as 30 times as the annual use of natural gas of Korea. It is essential to understand the mechanical behavior of marine sediments during depressurization process of GH because the subsidence of unconsolidated marine sediments can decrease the productivity of GH by destabilizing the well head on sea bed.

Many of the previous experiments of GH are focused on properties and/or productivity of GH. In addition, most of the previous numerical analysis on the mechanical behavior of marine sediments are on Nankai, Japan and Gulf of Mexico. Few study has been concentrated on depressurization as an exclusive production tool with in-situ scale of more than 100m.

To validate the application of FLAC^{2D} to this study, the result of subsidence experiment by depressurizing small sample of GH taken from Ulleung basin was compared with the results of FLAC^{2D} analysis and analytic solution.

FLAC^{2D} simulated the depressurization of GH with in-situ scale (200m x 180m) of UBGH-X which could be a target area of pilot production in 2015. The maximum part of subsidence near drilling hole was direct upper part (0.484m of subsidence) of GH layer rather than seabed (0.324m of subsidence) and the horizontal range of dissociation was 9.3 m after 1 month.

The parametric study of the subsidence was carried out with main parameters which were the speed of depressurization, the pressure on perforation of production pipe, porosity, permeability and the saturation of GH. As for the speed of depressurization, low speed of depressurization contributes to the stability of marine sediment. As for the pressure on perforation of production pipe, the amount of subsidence and the horizontal range of dissociation are proportional to depressurization value (ΔP). The increase of the other parameters, porosity, permeability and saturation of GH, makes the subsidence and dissociation range increased.

Among these properties, the permeability depending on time has the biggest effect on the amount of subsidence and the horizontal range. These results are expected to be useful to pilot and commercial production.

Keywords: saturation of gas hydrate, dissociation, unconsolidated layer,
subsidence, consolidation, FLAC^{2D}

Student Number: 2011-23427